

Grado Universitario en Ingeniería Mecánica
Curso 2017-2018

Trabajo Fin de Grado

“Diseño del sistema de airbags para la protección frente a impacto de un teléfono móvil”

Isaac Gallardo González

Tutor

Ramón Eulalio Zaera Polo

Leganés, 25 de septiembre de 2018

ÍNDICE

1.	Introducción	1
1.1.	Motivación	1
1.2.	Objetivos	2
1.3.	Antecedentes	3
1.4.	Estado de la cuestión	5
1.4.1.	Funciones del empaquetamiento	6
1.4.2.	Materiales habituales	8
1.4.3.	Los sistemas de amortiguamiento	13
2.	Metodología	16
2.1.	El método de los elementos finitos.....	17
2.1.1.	El método explícito.....	18
2.2.	Abaqus.....	18
2.3.	Proceso de modelado.....	19
2.4.	Criterios de diseño	25
2.4.1.	Teléfono móvil.....	25
2.4.2.	Airbags.....	27
2.4.3.	Velocidad inicial.....	27
2.4.4.	Presión de los airbags.....	29
2.4.5.	Prueba de convergencia de malla	31
3.	Resultados	34
3.1.	Modelos realizados	34
3.1.1.	Referencia (sin airbags)	34
3.1.2.	Modelo 1.	35
3.1.3.	Modelo 2	37
3.1.4.	Modelo 3	39
3.1.5.	Modelo 4	40
3.1.6.	Modelo 5	41
3.1.7.	Modelo 6	44
3.1.8.	Modelo 7	45
3.2.	Análisis de resultados.....	47
4.	presupuesto	52
5.	conclusiones y trabajos futuros	54
5.1.	Conclusiones.....	54

5.2. Trabajos futuros	55
Referencias.....	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Efecto del amortiguamiento en un impacto [1]	3
Figura 1.2. Envases de vidrio	9
Figura 1.3. Cartón corrugado [4]	10
Figura 1.4. Plástico de burbujas [6]	11
Figura 1.5. Sistema de airbags del vehículo Mars Pathfinder [10]	14
Figura 2.1. Creación del móvil en “Part”	20
Figura 2.2. Creación de superficie exterior del airbag, dentro de “Part”	20
Figura 2.3. Creación de cavidad fluida	21
Figura 2.4. Unión entre superficie de airbag y teléfono	22
Figura 2.5. Parte Suelo	22
Figura 2.6. Asignación de velocidad inicial.....	23
Figura 2.7. Conjunto mallado	24
Figura 2.8. Set de nodos.....	24
Figura 2.9. Variación de la aceleración en función de la presión de los airbags.....	30
Figura 2.10. Variación del desplazamiento nodal en función del tamaño de elemento de la malla.....	32
Figura 2.11. Evolución de la forma del conjunto con la variación del tamaño de elemento.....	33
Figura 3.1. Referencia.....	34
Figura 3.2. Aceleración de referencia sin airbags	35
Figura 3.3. Modelo 1	36
Figura 3.4. Aceleración del modelo 1.....	36
Figura 3.5. Modelo 2	37
Figura 3.6. Aceleración del modelo 2.....	37
Figura 3.7. Aceleración de modelo 2 con presión aumentada	38
Figura 3.8. Modelo 3	39
Figura 3.9. Aceleración del modelo 3.....	39
Figura 3.10. Modelo 4	40
Figura 3.11. Aceleración del modelo 4.....	41
Figura 3.12. Modelo 5	42
Figura 3.13. Aceleración del modelo 5.....	42
Figura 3.14. Modelo 5 con airbags modificados	43
Figura 3.15. Aceleración del modelo 5 modificado.....	43
Figura 3.16. Modelo 6	44
Figura 3.17. Aceleración del modelo 6.....	45
Figura 3.18. Modelo 7	46
Figura 3.19. Aceleración del modelo 7.....	46
Figura 3.20. Comparación de aceleraciones de modelos fallidos (por orden)	47
Figura 3.21. Comparación de aceleraciones de modelos exitosos (por orden)	49

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

El embalaje y protección de bienes ha ido cobrando cada vez mayor importancia en la sociedad moderna y en la actualidad es una parte importante de todo tipo de industrias y actividades comerciales.

Desde el punto de vista de los consumidores este hecho resulta inadvertido habitualmente, por lo menos de forma directa. Si el empaquetamiento cumple su función correctamente el cliente no toma consciencia de la parte del coste asociada al transporte y embalaje y de su valor para la calidad del bien obtenido. De forma opuesta, cuando el embalaje es deficiente y se produce un fallo resulta totalmente apreciable que la pérdida de valor está unida al empaquetamiento y es evidente el lastre para la calidad que supone la falta de funcionalidad de este.

Cuando el empaquetamiento no es adecuado pueden aparecer gran cantidad de problemas, como daño total o parcial en el producto, sobrecostes en el transporte, contaminación del ambiente, daños para la salud, pérdida de los productos, o degradación de estos. Todo ello tiene una repercusión económica tanto para el proveedor como para el distribuidor, además de un daño a la opinión que se genera para el consumidor.

Esto hace que sea imprescindible asegurar la calidad del producto, de la que el embalaje es una parte inseparable, dada la necesidad de que el objeto llegue en perfecto estado hasta el consumidor. Debido a la gran distancia que pueden llegar a recorrer es necesario hacer frente por un lado al riesgo de daño en los productos y por otro a los riesgos externos que pueden afectar al entorno.

Adicionalmente hay un amplio campo de estudio para innovaciones. Esto incluye el desarrollo de nuevos materiales y sistemas, y la interacción de estos con los productos a proteger. Las propiedades de los nuevos dispositivos y materiales descubiertos obligan a buscar nuevos diseños para satisfacer las nuevas demandas.

1.2. Objetivos

El planteamiento del estudio realizado en el presente trabajo ha tratado de encontrar un diseño que optimice la protección contra impactos de un teléfono móvil utilizando para ello un sistema de airbags.

Se ha comenzado con un modelo de referencia para obtener datos del impacto sin amortiguamiento. A partir de estos datos se han llevado a cabo distintas simulaciones para buscar la mayor eficacia y efectividad priorizando la protección del objeto.

Aunque también deben cumplirse las funciones de contención y preservación del bien el estudio no se ha centrado en ellas por constituir un ámbito de estudio más diferenciado tanto en diseño como necesidades materiales. De esta forma se ha centrado en las posibilidades de mejora en el diseño de la protección.

Se ha elegido realizar los modelos a través del software Abaqus que lleva a cabo la simulación utilizando el método numérico de los elementos finitos como herramienta de cálculo.

Los diseños han sido realizados con el objetivo de encontrar las configuraciones que maximicen el aprovechamiento del sistema de amortiguación. Se han probado distintas geometrías de airbag y con ello se ha buscado comprobar la viabilidad de estas. Por un lado se ha tratado de encontrar la capacidad de optimizar el volumen ocupado por el conjunto y el material invertido sin comprometer la eficiencia de la protección. Este objetivo se considera relevante dada la necesidad creciente de invertir energía en empaquetar y transportar productos de forma económica.

Por otro lado se ha tratado de encontrar el diseño que asegura el mayor nivel de protección frente a choques sin considerar minimización del tamaño o de material de airbag usado, aunque siempre manteniendo unas proporciones realistas. Se ha tratado además de encontrar una relación equilibrada entre el coste en espacio y calidad del amortiguamiento.

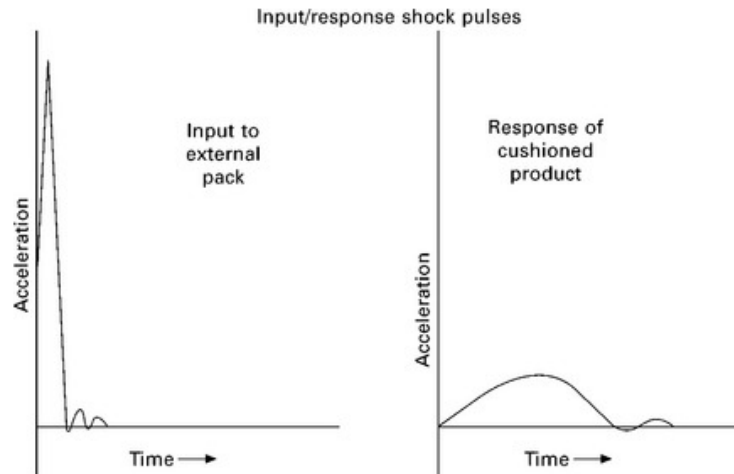


Figura 1.1 Efecto del amortiguamiento en un impacto [1]

Para comprobar la calidad de los airbags se ha medido la aceleración a lo largo del tiempo de cada simulación, y las curvas obtenidas se han utilizado para realizar un análisis comparativo entre los modelos.

1.3. Antecedentes

Desde la antigüedad el comercio ha requerido el desarrollo de técnicas para facilitar el intercambio de bienes, tanto entre individuos como entre comunidades o sociedades. Gracias a esto se pudieron expandir con más facilidad los pueblos y se produjo un mayor intercambio cultural.

A partir de la revolución industrial, la necesidad de enviar mercancías a un destino de forma segura se acrecentó en la misma medida de manera que las mayores distancias y facilidades de transporte crearon un nuevo escenario en el negocio de los embalajes: nuevos materiales, nuevas protecciones, nuevos desafíos en la economía de los mismos.

Un ejemplo es que la posibilidad de transportar comida y medicinas en buen estado para toda la población permitió el gran aumento en la calidad de vida que llevó al desarrollo de muchos países.

Esta tendencia ha ido aumentando según las sociedades se han desarrollado y modernizado. Durante el último siglo los cambios sociales tales como el crecimiento de

las ciudades, la globalización, el desarrollo tecnológico y el aumento de bienes y materias disponibles para la sociedad han producido un gran cambio en el comercio y transporte de mercancías.

Por un lado, el crecimiento de las ciudades ha supuesto la necesidad de transportar alimentos desde los ambientes agrarios para satisfacer la demanda de la gran cantidad de habitantes. También ha de considerarse el cambio en el modo de vida que ha provocado la creación de una sociedad de consumo que demanda todo tipo de bienes para cubrir el elevado número de necesidades adquisitivas creadas.

El desarrollo tecnológico ha hecho que no sólo sea necesario transportar los bienes básicos como alimentos, sino también los objetos de uso cotidiano como ordenadores, teléfonos, electrodomésticos, etc.

La globalización ha significado la redistribución de los medios de producción a escala mundial. Gran parte de los aparatos electrónicos son manufacturados en unos pocos países asiáticos para ser distribuidos en todo el mundo, y muchos otros bienes que se consumen de forma global provienen de lugares muy específicos (por ejemplo, el vino procede principalmente de la Europa mediterránea).

Todo esto ha implicado un cambio en la forma de realizar las actividades comerciales. Se requiere transportar una gran cantidad de objetos con características muy diversas a una enorme distancia con seguridad de que llegue en buen estado. Esto significa que la tecnología de embalaje y protección de mercancías es una parte indispensable para la viabilidad económica de estas actividades. Si no se asegura la efectividad en el transporte los productos dañados no aportarán beneficios y supondrán un gran coste (de producción, transporte, etc.). Por ello se invierte una gran cantidad de recursos en la fabricación de materiales para el embalaje.

La globalidad del mercado ha producido cambios en los modelos de negocios: por un lado las relaciones entre el productor y el distribuidor pueden adoptar nuevos esquemas, y por otra parte, en la cadena de suministro aparece un mayor número de actividades logísticas, normativa aplicable y gestiones.

Para asegurar que los bienes lleguen al consumidor el papel del distribuidor es imprescindible. El sistema económico marcado por una globalización cada vez mayor

ha provocado que surjan grandes empresas dedicadas de forma exclusiva al suministro de bienes producidos por otros. Un claro ejemplo de esto es Amazon, que almacena y distribuye bienes bajo pedido pero estos proceden de terceros.

Estas empresas dependen por completo de garantizar que la mercancía termine su trayecto en buen estado, pues por un lado necesitan que la satisfacción del consumidor con el producto sea adecuada, y por otro, necesitan mantener la imagen de calidad que transmita a los clientes confianza para seguir pagando por sus servicios. Por consiguiente, los distribuidores tienen la necesidad de invertir en la protección de todos los bienes que transportan y deben estudiar los métodos más apropiados para ello.

Además, es importante la dimensión medioambiental y la sostenibilidad. Hay un aspecto cuantitativo, pues la cantidad de embalajes y actividades relacionadas aumenta; y hay un aspecto cualitativo en el que se busca el máximo aprovechamiento de los recursos energéticos minimizando el impacto medioambiental y económico.

Por un lado, esta tendencia a depender cada vez más de las funciones del empaquetamiento hace que se necesite invertir cada vez más recursos en ello. Por otro, no se puede prescindir de ello puesto que no invertir lo suficiente en ello provocará un gran aumento en el desperdicio de bienes que no llegan en buenas condiciones. Este hecho puede ser mucho más perjudicial tanto para la economía como para el medio ambiente que el excesivo gasto de energía y materias primas en sistemas de protección.

1.4. Estado de la cuestión

En la actualidad existe una amplia variación en los sistemas de embalaje y protección de bienes, pues cada producto tiene unas necesidades determinadas. Por ello hay un gran número de posibilidades según la función que el empaquetamiento deba cumplir, y las circunstancias y el tipo de objeto al que deba adecuarse.

En primer lugar pueden establecerse unos niveles que cataloguen el tipo de empaquetamiento según su relación con el producto [2]:

- Embalaje primario: es el paquete que contiene al producto y que recibe el consumidor. En el caso de un teléfono móvil serían los airbags y la caja que contiene todos los elementos.

- Embalaje secundario: para agrupar conjuntos de embalaje primario para facilitar la distribución. Un ejemplo son los paquetes de plástico que incluyen múltiples productos del mismo tipo como botellas o latas.
- Embalaje terciario: es el que se utiliza para agrupar los embalajes secundarios para facilitar el transporte o el apilamiento. Uno de los casos más comunes es el pallet.

1.4.1. Funciones del empaquetamiento

Debido a la gran cantidad de procesos tecnológicos envueltos en las actividades de empaquetamiento, es necesario distinguir las funciones que deben cumplir los envases y embalajes y que se exponen a continuación [1]:

- Contención. En primer lugar los embalajes sirven como contenedor para evitar pérdida de componentes o derramamiento de sustancias. Esta función resulta básica y en el caso de elementos tóxicos es imprescindible para que no se produzcan peligros para la salud. Esto es especialmente apreciable en el caso de los líquidos (por ejemplo alimentos como la leche o la cerveza) que requieren llegar al consumidor sin pérdidas, aunque también es muy relevante cuando se deben enviar lotes con muchas piezas juntas.
- Protección. Es necesario reducir el daño físico que pueden recibir los productos. Esta necesidad es obvia en el caso de objetos frágiles como los que contienen componentes electrónicos o vidrio, sin embargo es necesario ofrecer cierto nivel de protección en todos los bienes transportados y almacenados. Los tipos de daños frente a los que se debe ofrecer protección son:
 - Impacto: consiste en el choque del objeto con una superficie, generalmente el suelo, que provoca un cambio brusco en la velocidad, y por ello una fuerza sobre dicho objeto que puede provocar daños. Para evitar estos daños se utilizan materiales que amortigüen el impacto, como el plástico de burbujas, las espumas poliméricas o los airbags.
 - Vibración: se produce una oscilación de la carga. Es imposible de evitar durante el transporte, por lo cual el empaquetado de mercancías debe hacerse de forma que el efecto de estas vibraciones no provoque daños.

Esto puede lograrse mediante un diseño que no permita a los objetos moverse dentro de sus compartimentos, y organizando adecuadamente el espacio con los paquetes para evitar el movimiento entre ellos. También resulta beneficioso en este caso el uso de materiales que absorban las vibraciones, similares a los usados contra impacto.

- Compresión: al agrupar paquetes se produce de forma inevitable, tanto en el transporte como en el almacenaje. Para lograr que este fenómeno no dañe los objetos empaquetados se debe asegurar un diseño en los paquetes y materiales que distribuya las cargas de forma equitativa y que sea capaz de soportar los esfuerzos sin comprometer los equipos. Esto puede resolverse mediante el apilamiento en pallets, o bien con embalajes resistentes como latas y botellas.
 - Temperatura, luz y humedad: ocurren de forma habitual por exposición al medio, y especialmente cuando se efectúa el transporte. Puesto que muchos bienes pueden degradarse por el exceso de dichos elementos, debe en muchos casos asegurarse un sellado óptimo. Por otro lado, hay materiales especialmente sensibles a la humedad o la temperatura como el cartón que pueden no ser recomendables para proteger mercancías sensibles.
 - Polvo, animales y bacterias: en el caso de alimentos provocan daños con facilidad, y pueden dar lugar a peligros medioambientales y sanitarios; sin embargo también pueden provocar la degradación de otros bienes. Esto hace necesario usar materiales que aíslen bien del entorno, al igual que con la temperatura o la humedad.
- Preservación. Esto implica la prevención y reducción de cambios debidos a reacciones con el ambiente para aumentar la vida del objeto. Esta función es imprescindible en alimentación o en medicina, aunque se da en muchos ámbitos.

Además, en el caso de recipientes que siguen en uso tras el transporte (botellas, etc.) el diseño no solo debe cumplir todas las funciones comentadas, también debe permitir un uso eficiente que satisfaga las necesidades de los consumidores.

También pueden establecerse otras funciones que deben ser valoradas, como el marketing, que puede ser totalmente indispensable para vender el producto. En muchas ocasiones el empaquetamiento primario que llega al consumidor está diseñado para aportar valor comercial que sea percibido por el consumidor (por ejemplo las cajas con juguetes para niños están llenas de imágenes con colores vivos y resaltan lo más llamativo del producto).

Además el embalaje primario también suele ser la fuente de información del producto para el consumidor: muestra las utilidades y especificaciones del producto para que el cliente pueda tener conocimiento de lo que se ofrece.

1.4.2. Materiales habituales

Además de la distinción entre las funcionalidades y niveles, se deben mencionar los distintos materiales y sus características para el empaquetamiento.

Como se ha comentado, el empaquetamiento de mercancías ha sido relevante desde la antigüedad, y por ello existen gran cantidad de materiales usados para ello, algunos de los cuales han cambiado poco, como el vidrio, mientras otros son todavía objeto de investigación, como muchos materiales compuestos o los biopolímeros.

Vidrio.

Este material se usa desde la antigüedad, y en la actualidad sigue siendo uno de los más comunes para empaquetamiento, especialmente de líquidos. Se fabrica con óxido de silicio, componente de la arena, por lo que la materia prima no tiene un alto coste, aunque debido a que se requieren altas temperaturas para fundirlo, tiene un elevado coste energético.

El vidrio no reacciona con la mayoría de sustancias químicas y es impermeable a gases, por lo que es muy útil para almacenar sustancias tóxicas o proteger de degradación alimentos. Además su rigidez permite soportar compresión cuando es almacenado.

Sin embargo su elevada densidad hace que como material de embalaje sea muy pesado, y su fragilidad lo hace inservible para proteger frente a impactos o golpes, pues se rompe con facilidad, y los fragmentos suelen ser afilados y peligrosos para la salud.



Figura 1.2. Envases de vidrio

Papel y cartón.

Estos materiales están principalmente hechos con celulosa, a la que se le aplican diversos tratamientos. Algunas de sus ventajas como embalaje son su ligereza, bajo coste y que son completamente reciclables. Sin embargo tienen desventajas como no ser resistentes a los líquidos ni a los agentes químicos y degradarse con la exposición a algunos ambientes.

El papel, al ser poco rígido se suele usar para fabricar bolsas, mientras el cartón es el componente principal de las cajas. Puesto que estos materiales se degradan a veces deben ser mezclados con otros elementos como polímeros para ofrecer la protección adecuada.

Gracias a su flexibilidad estos materiales también tienen un uso común como amortiguamiento. Aquí destaca el cartón corrugado, formado por varias capas de papel o cartón unidas. Las capas exteriores son lisas y el interior ondulado, con lo que se obtiene mayor resistencia y rigidez. La cantidad de capas depende de las necesidades de

empaquetamiento; los tipos más habituales son el simple, de tres capas, y el doble, con cinco (el interior tiene dos papeles ondulados separados por uno liso) [3].

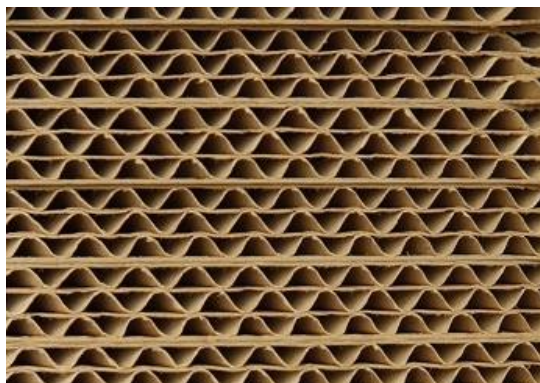


Figura 1.3. Cartón corrugado [4]

Metales.

Son muy utilizados para envasar alimentos, aunque se encuentran en todo tipo de industrias. Su alta densidad y poca capacidad para absorber energía en impactos o vibraciones son desventajas; sin embargo su impermeabilidad y resistencia a roturas los hacen perfectos para contener líquidos o gases y alimentos. Un ejemplo son las latas de comida, que permiten mantener alimentos durante largos periodos de tiempo sin deteriorarse gracias a diversos tratamientos y un sellado hermético que impide pasar agentes biológicos, aire, humedad, etc [5].

Otra ventaja es la maleabilidad, que permite fabricar láminas muy finas, como el papel de aluminio, que permiten hacer empaquetamientos flexibles y ligeros.

Polímeros.

Aunque son los materiales más recientes, son los que han tenido un mayor aumento de uso desde su introducción en el mercado a mediados del siglo pasado.

Los polímeros tienen aplicaciones en todo tipo de ámbitos, no obstante el embalaje ocupa una parte importante de su uso. De todo el plástico que se fabrica para empaquetar, en torno al 70% se utiliza para comida y bebida [1]. El porcentaje restante se distribuye entre las demás industrias.

Algunas ventajas de los plásticos respecto a materiales como el vidrio o el metal son su menor peso, mayor facilidad para dar distintas formas y gran capacidad de adecuar sus propiedades a la función que deben desempeñar. Gracias a esto los plásticos se pueden usar en todo tipo de empaquetamientos, tanto rígidos como botellas o cajas como flexibles como sistemas de amortiguamiento, donde destacan los airbags o el plástico de burbujas.

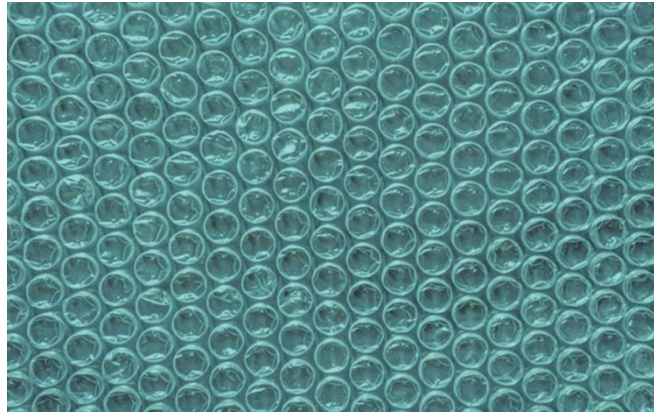


Figura 1.4. Plástico de burbujas [6]

La alta variedad de capacidades y usos de los polímeros se debe a su gran variedad. Algunos de los más habituales, especialmente en su aplicación para empaquetamiento, son [1]:

- Polietileno: suele catalogarse según su densidad. Según aumenta las propiedades mecánicas mejoran.
 - Polietileno de baja densidad: es bastante elástico y transparente, se suele utilizar en forma de película. Es usado como embalaje secundario para empaquetar elementos como botellas y también es habitual su fabricación como bolsas de plástico.
 - Polietileno de alta densidad: se suele usar para empaquetamientos rígidos como botellas o contenedores.
- Polipropileno.
- Policloruro de vinilo.
- Poliestireno.

Aunque existen muchos polímeros, y se han realizado variaciones de los anteriores, estos son los más comunes en la industria del empaquetamiento. Todos ellos se utilizan para realizar envases, bandejas, bolsas y otras formas de empaquetamiento.

Por otro lado, si se considera el aspecto medioambiental, todos estos polímeros son compuestos provenientes del petróleo, con lo que no resultan sostenibles a largo plazo, lo cual ha llevado a desarrollar biopolímeros que no dependan del petróleo.

Otra propiedad igualmente importante es su biodegradabilidad. La mayoría de estos polímeros son biodegradables, lo que significa que tras ser desechados sus estructuras son descompuestas por microorganismos, logrando así evitar la acumulación de plástico que daña el medio ambiente. No obstante debe entenderse que esto no es exclusivo de los biopolímeros, y existen plásticos derivados del petróleo que también son biodegradables.

Estos biopolímeros podrían dividirse en [7]:

- Polímeros naturales: son los que se producen en organismos vivos. El caucho natural es uno de los más comunes, aunque suele usarse tras ser procesado. Otro ejemplo muy habitual es la celulosa, sintetizada por las plantas.
- Bioplásticos: son polímeros similares a los derivados del petróleo, pero se obtienen de una forma alternativa, que puede ser:
 - A partir de polímeros naturales procedentes de biomasa.
 - A partir de monómeros de origen biológico.
 - A partir de polímeros producidos por microorganismos.

También se pueden hacer materiales compuestos a partir de biopolímeros uniéndolos con plásticos convencionales u otros materiales, reforzando algunas propiedades y sobre todo disminuyendo el coste.

El desarrollo de estos polímeros permitiría reducir la dependencia del petróleo además de disminuir el impacto que generan los residuos tras su uso. La fabricación de materiales que no dependan de un recurso no renovable es imprescindible para la sostenibilidad tecnológica y ecológica a largo plazo.

Estos beneficios serían especialmente aprovechados en sectores como el del empaquetamiento, de vital importancia para el modelo de vida actual y dada la gran cantidad de recursos que se necesitan y la contaminación que produce la gran cantidad de plásticos que son desechados tras su uso.

Por otra parte debe considerarse el coste económico de fabricar estos materiales, pues requieren un gasto de energía y suelo para producir biomasa, lo que conlleva utilizar combustible procedente del petróleo y utilizar los recursos previamente usados para actividades como la agricultura.

Aunque en la actualidad estos materiales todavía están en fase de desarrollo e investigación y su uso comercial es muy pequeño, por lo que no se puede saber con exactitud las propiedades y las aplicaciones reales que pueden tener en la industria.

4.1.3. Los sistemas de amortiguamiento

Como ha sido comentado, una de las principales funciones del empaquetamiento de objetos es su protección frente a impactos o excesivas vibraciones o compresión. Pero la necesidad de amortiguar estos efectos sobre algún elemento es mucho más amplia, y es necesaria en cualquier ámbito en el que algún elemento sufra riesgos.

Además de la protección de mercancías, es necesario el uso de estos sistemas para prevenir riesgos en las personas, como en el caso de los airbags de los vehículos, o para garantizar la seguridad de estructuras sometidas a esfuerzos puntuales.

Es habitual el uso de estructuras de tipo sándwich de papel o polímero con estructuras de panal de abeja para amortiguar frente a impacto o vibración gracias a su capacidad para absorber energía, y dada la cantidad de parámetros que influyen existen numerosas investigaciones sobre su optimización [8].

Por otro lado las espumas están muy extendidas, especialmente para aislamiento térmico y acústico y absorción de energía en choques [9]. Estas estructuras están muy difundidas y se pueden fabricar de diversos materiales, como el aluminio o el polietileno.

Existen muchos otros métodos para evitar daños por impactos; de ellos uno de los más habituales en algunas aplicaciones es el airbag.

Los airbags (bolsa de aire en inglés) son membranas que contienen en su interior gas a una presión mayor que la atmosférica, y son colocados para interponerse entre el objeto a proteger y la superficie de impacto.

Una de sus aplicaciones más comunes es en coches para evitar daños en los ocupantes en caso de accidente. Cuando se produce un impacto los airbags se inflan rápidamente evitando que el ocupante se golpee contra el vehículo.

Quizá el ámbito científico en el que ha habido más investigación es el de la exploración espacial. Las sondas enviadas a Marte cuentan con un sistema de airbags para garantizar que el aterrizaje sea suave y no se produzcan daños [10]. Debido a lo costoso de los proyectos espaciales ha sido importante dimensionar y calcular de forma adecuada el sistema de airbags que mejor funcione.

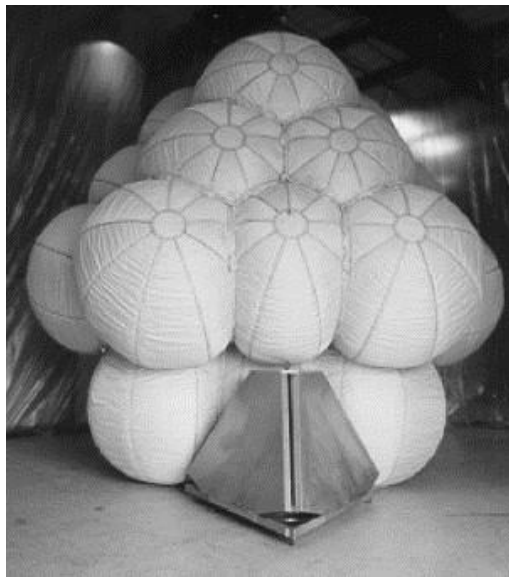


Figura 1.5. Sistema de airbags del vehículo Mars Pathfinder [10]

Otra aplicación de los airbags es en la industria del embalaje. Muchos productos con gran coste o frágiles, como botellas o dispositivos electrónicos utilizan airbags como embalaje primario. Estos suelen ser de película de polímeros como polietileno o

polipropileno, a diferencia de los airbags para aplicaciones con mayor sollicitación mecánica como los que se han comentado anteriormente, que suelen estar fabricados con fibras más resistentes.

2. METODOLOGÍA

La redacción del problema presentado se puede llevar a cabo de distintas formas. Una posibilidad es realizar experimentos, para lo que es necesario un laboratorio en el que realizar los ensayos. Se deben fabricar los distintos prototipos y probarlos. Aunque este método puede ser bastante exacto resulta muy costoso en términos de tiempo y dinero, pues hace falta realizar numerosos experimentos y fabricar modelos, además tener que usar varios móviles.

Otra forma de proceder es utilizando métodos analíticos. Se pueden modelar los problemas utilizando elementos como resortes que conecten los cuerpos que chocan y mediante las ecuaciones de la mecánica resolver el problema [11]. Con ello se puede llegar a una expresión exacta que describa el funcionamiento del problema. No obstante la solución que se obtiene es de la aproximación hecha, y modelar con precisión algunos sistemas de amortiguamiento puede resultar complicado.

Una última forma es el modelado por ordenador. Mediante este método puede ser complicado simular eventos reales con absoluta precisión, no obstante se pueden conseguir resultados bastante aproximados que pueden economizar coste y tiempo.

Por todo ello se ha decidido realizar el modelado del impacto del teléfono con airbags de forma informática. Para analizar los resultados de las simulaciones se utilizará una variable de control que permita comparar los resultados.

Puesto que es complicado simular de forma exacta la configuración de un teléfono móvil, comprobar las tensiones puede no proporcionar resultados concluyentes, por lo que la variable que se analizará es la aceleración. Puesto que un impacto implica una fuerza que provoca un cambio brusco en la velocidad la aceleración sufrida por el objeto proporciona información sobre las tensiones sin requerir un modelado del objeto perfectamente fiel a la realidad.

A continuación se exponen los métodos que se han utilizado para el modelado y los criterios que se han seguido para realizar el diseño.

2.1. El método de los elementos finitos

El método de los elementos finitos es un método numérico que permite resolver problemas con ecuaciones diferenciales de gran complejidad. Está enfocado al cálculo mediante programas informáticos, dado el tamaño y complejidad de los sistemas en los que es aplicado. Se utiliza en numerosos ámbitos de la ciencia y la ingeniería, como la física, biología, ingeniería eléctrica, mecánica de fluidos, transferencia de calor o la mecánica de sólidos.

Esta herramienta no ofrece una solución exacta y única sino que hace una aproximación de problemas continuos mediante una división del sistema en una cantidad limitada de elementos para resolverlo como un problema discreto [12].

La discretización se hace dividiendo el sistema en elementos, que se conectan mediante nodos. En un problema mecánico, los elementos serán partes de la superficie o volumen de un sólido, y estarán divididos por una red de nodos.

De forma general, para hacer el cálculo primero deben ser conocidas las propiedades de los elementos, la geometría, y las cargas y condiciones de contorno. En mecánica de sólidos se definen se utilizan las variables de desplazamientos asociados a los nodos como \mathbf{u} , y las cargas que actúan sobre dichos nodos, \mathbf{f} .

Las cargas se relacionan con los desplazamientos a través de la matriz de rigidez \mathbf{K} , en la que figuran las propiedades del sólido. Esta relación suele ser lineal aunque puede ser de otro tipo. De esta forma se obtiene un sistema de ecuaciones que se resuelve de forma matricial. Este proceso se puede generalizar a otros ámbitos, como ha sido comentado, sustituyendo cargas y desplazamientos por los parámetros propios del caso.

Se puede establecer la relación algebraica entre matrices como [13]:

$$[\mathbf{K}]\{\mathbf{u}\} = \{\mathbf{f}\}$$

2.1.1. El método explícito

En problemas dinámicos como en el presente caso la integración temporal puede llevarse a cabo por el método implícito o por el método explícito. El método implícito calcula cada intervalo de tiempo a partir de los datos del mismo intervalo y del anterior, y requiere iteraciones para cada intervalo. El error que se produce está acotado a un valor que depende de la exactitud de la discretización. Por otro lado, el método explícito utiliza la información del intervalo anterior para calcular el siguiente mediante una formulación dinámica que no requiere iteraciones. Este método es condicionalmente estable, lo que significa que pueden provocarse errores excesivos que invaliden la solución. Para que el método sea estable el intervalo de tiempo debe ser menor que un valor crítico función de la velocidad de las ondas en el material y el tamaño de los elementos [14].

Puesto que en problemas dinámicos rápidos como análisis de impactos los tiempos son cortos, el método explícito no requiere demasiados intervalos y el tiempo de computación es mucho menor que si se utiliza el método implícito. Por esta razón se ha optado por dicho método, pues el programa elige el intervalo de tiempo para garantizar que el método sea estable [15].

2.2. Abaqus

Abaqus es un software de simulación para ingeniería que utiliza el método de los elementos finitos para realizar cálculos. Su utilidad es muy amplia al integrar opciones para aplicar en numerosos ámbitos, como electromagnetismo, termodinámica y mecánica de fluidos, ingeniería estructural o mecánica de sólidos.

Este programa resulta adecuado para el diseño en ingeniería dadas sus cualidades: posibilidad de incluir muy diversas opciones en cada problema y resolución de problemas de distinta clase, gran capacidad de computación para los problemas y la posibilidad de obtener mucha resolución. Gracias a todo esto está ampliamente difundido en la industria y el ámbito académico.

Por estos motivos se ha decidido utilizar este software para realizar los diseños y llevar a cabo las simulaciones.

Por otra parte, el software puede ser problemático en algunas de sus características: los problemas de gran tamaño resueltos con muestreos de alta resolución pueden conllevar tiempos de cálculo excesivos, y generar archivos de gran tamaño (varios GB), por lo que un equipo de poca potencia y capacidad puede no ser adecuado para implementar Abaqus.

Debido a la variedad de problemas que pueden resolverse, aprender a usar el programa puede llevar un tiempo considerable, dado que cada tipo de problema tiene numerosos parámetros propios que deben conocerse, y se pueden dar numerosos fallos que compliquen las modelaciones y para los que sea necesario invertir gran cantidad de tiempo.

Otra limitación es el precio de la licencia, pues en su versión comercial puede resultar un coste excesivo para muchas empresas.

2.3. Proceso de modelado

Creación de las partes y propiedades

En primer lugar se crean el móvil y los airbags en el módulo *part* como sólidos deformables de extrusión en tres dimensiones. Después el airbag se transforma en membrana con el control “Tools”. Es importante que el airbag sea de tipo membrana porque estos elementos sólo soportan tensión en el plano de su superficie, y otro tipo de elemento formaría una carcasa rígida. El airbag se crea en primer lugar como sólido porque en el caso de hacer modificaciones a la geometría resulta más sencillo trabajar con un sólido.

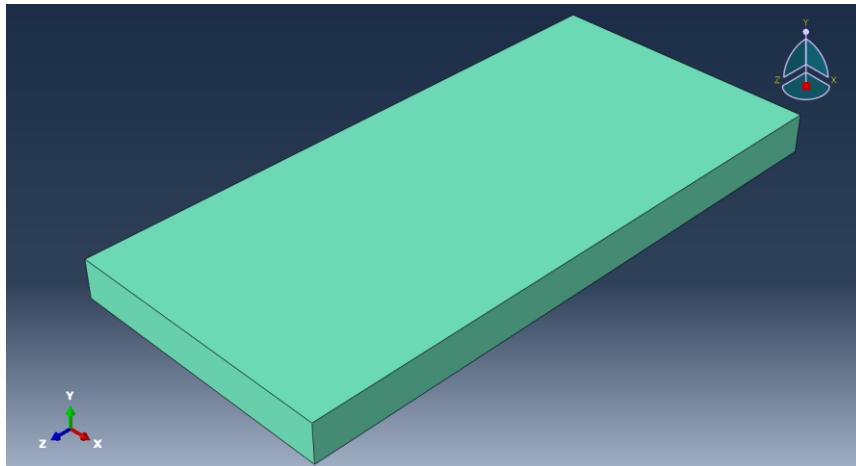


Figura 2.1. Creación del móvil en “Part”

Se generan las superficies que Abaqus requiere, externas para las interacciones entre partes e internas para el fluido en el airbag. Además será necesario en el módulo *instance* desplazar los airbags creados para que encajen con el teléfono, o no podrán unirse después.

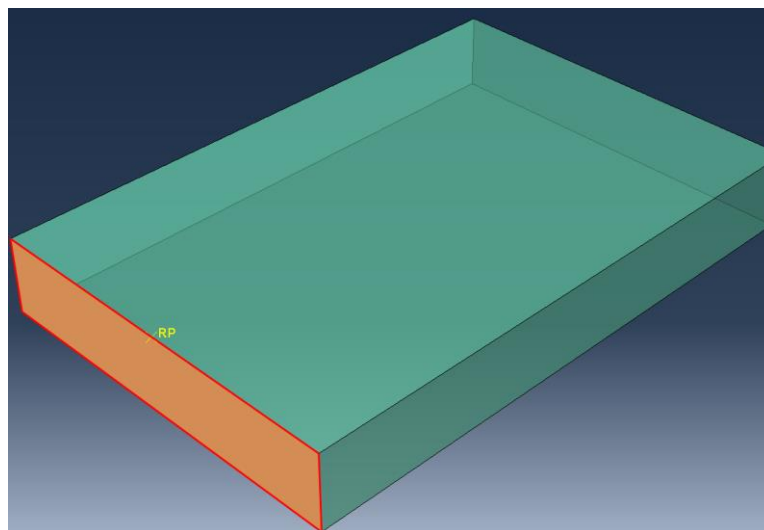


Figura 2.2. Creación de superficie exterior del airbag, dentro de “Part”

Puesto que el móvil debe estar completamente protegido es necesario que haya suficientes airbags en contacto con el móvil, por lo que en *instance* se replican los airbags mediante patrones cuando se utiliza la misma geometría.

A continuación se crea la interacción que permite a Abaqus procesar las características del interior del airbag: en el módulo *interaction* se genera la cavidad que irá llena de aire asociada a la superficie interior del airbag, y se introducen los datos del gas. Se define el fluido como neumático y se introducen los valores de peso molecular y capacidad calorífica. La presión es introducida en *predefined field*, en el módulo *step*.

Puesto que el gas utilizado es aire en condiciones de temperatura ambiente, se introducen los siguientes valores:

- Peso molar: 0.02896 kg/mol.
- Capacidad calorífica: 1000 J/kg·K o 28.96 J/mol·K

La presión que se introduce, sobre lo que se discute en criterios de diseño, es la presión manométrica del interior de los airbags, y debe marcarse en Abaqus que la presión externa es cero.

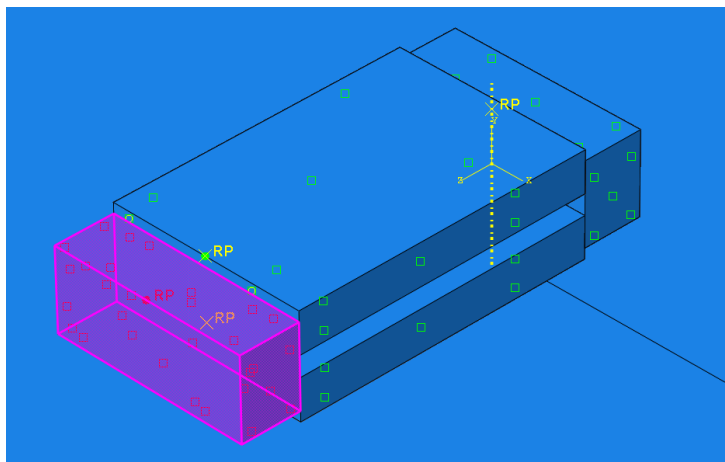


Figura 2.3. Creación de cavidad fluida

Después se crean los materiales a los que se da propiedades de densidad, elasticidad y plasticidad, y de los que se habla con detalle más adelante. Se generan las secciones y se asocian al material. En el caso del móvil será sección sólida y en el caso del airbag de tipo membrana. Por último estas secciones son asignadas a las partes creadas.

Es necesario unir los airbags entre sí y con el móvil, puesto que de otra forma los elementos se separarían durante el impacto. Para ello se utiliza la opción *Tie*, en la que se seleccionan dos superficies. Esto impide que haya movimiento relativo entre ellas. Se selecciona una de ellas como superficie maestra y la otra como esclava, de forma que se

impondrán los movimientos de la maestra. Se establece como criterio que el teléfono sea la superficie maestra.

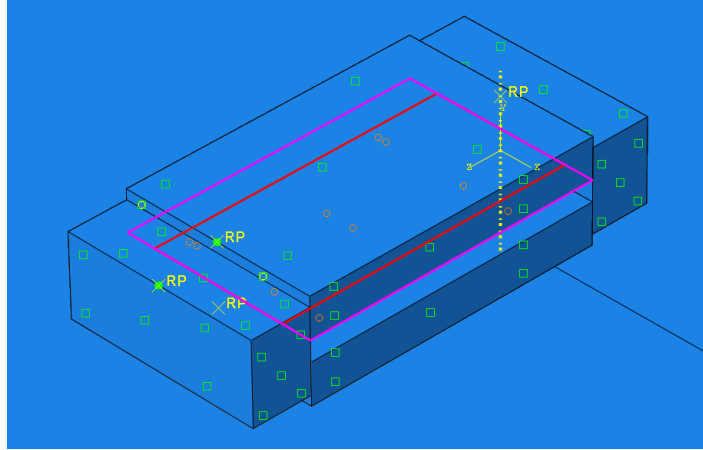


Figura 2.4. Unión entre superficie de airbag y teléfono

A continuación se crea la parte “suelo” como sólido rígido indeformable. Debe ser más grande que el objeto para que este impacte en su totalidad y no haya posibilidad de que el conjunto móvil-airbags se salga. Para ello se establece un diámetro de un metro.

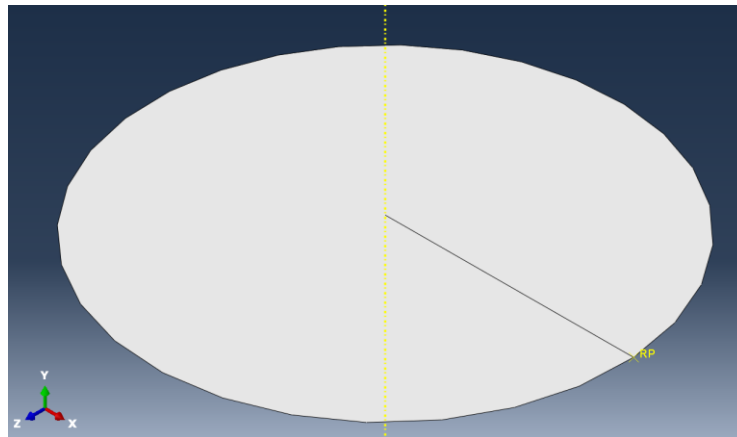


Figura 2.5. Parte Suelo

Se establece en *boundary conditions* un empotramiento para que el suelo permanezca inmóvil cuando el móvil impacte. Este tipo de elemento, denominado por el programa

como *analytical rigid*, no necesita ser mallado ni requiere tener material ni sección asignado al ser un sólido rígido sin ningún comportamiento mecánico.

En la sección *predefined field* se le da un valor de velocidad inicial al conjunto del teléfono con los airbags y en *interaction* se establecen las condiciones de contacto entre el suelo y el airbag. Esto incluye condiciones de fricción, para lo que se aplicó un coeficiente de 0.2. Este es un valor genérico que permita fenómenos de disipación de energía, pues dado que el suelo es un sólido rígido teórico no se puede asociar un coeficiente exacto.

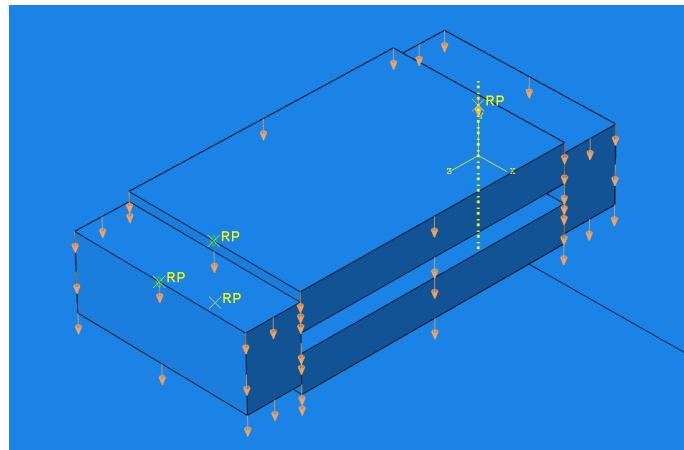


Figura 2.6. Asignación de velocidad inicial

Después se establecen propiedades generales del modelo:

- Temperatura cero absoluta: -273.16 K
- Constante universal de los gases: $8.3144\text{ J/mol}\cdot\text{K}$

A continuación se realiza la operación de mallado.

Como se ha comentado, el método de los elementos finitos convierte un sistema continuo en uno discreto, y Abaqus realiza este proceso generando una malla, que se realiza para cada parte. El móvil utilizará elementos tipo C3D8R, para modelo explícito en tres dimensiones. Los airbags usarán elementos M3D4R, para membranas en modelo explícito.

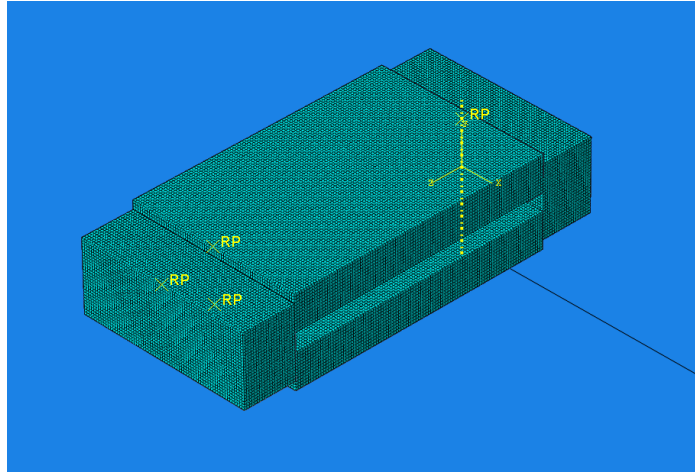


Figura 2.7. Conjunto mallado

Una vez se ha hecho el mallado, se crea un set de nodos en el móvil, dentro del módulo *mesh*. Estos nodos se utilizarán para medir la aceleración al ensayar los modelos. El uso de unos pocos nodos se debe a que realizar la cuantización para todo el modelo requeriría archivos muy grandes, lo cual no es práctico. Por ello se escogen 4 nodos distribuidos en la geometría del teléfono. Además, puesto que el objeto es un sólido compacto con cierta rigidez y una geometría sencilla se espera que el objeto sufra aceleraciones similares en todos sus puntos.

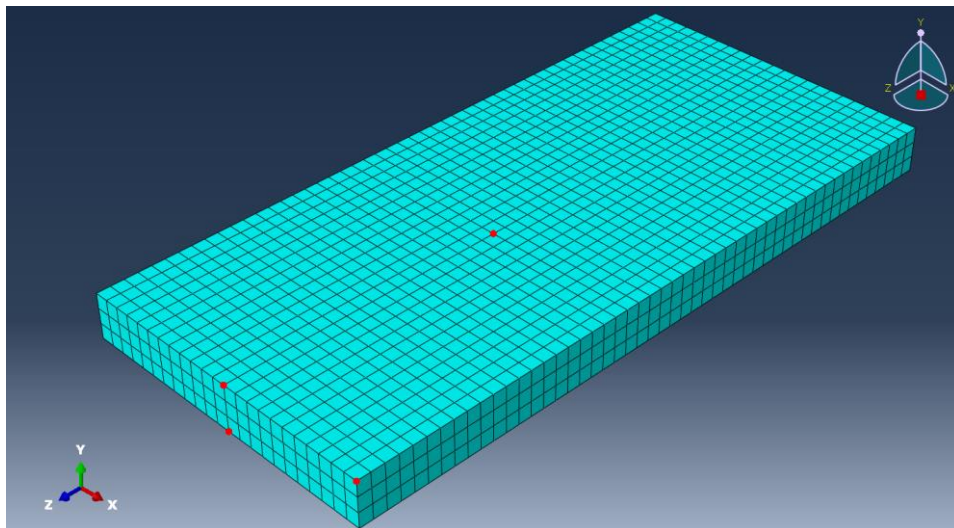


Figura 2.8. Set de nodos

También es importante que los nodos escogidos sean los mismos para cada modelo, pues elegir unos distintos podría modificar los valores obtenidos en la simulación dificultando el análisis comparativo.

Obtención de resultados.

Se finaliza el modelo con la edición del *history output*, donde se establecen los parámetros que serán analizados. Se pide a Abaqus que utilice el set de nodos previamente definido para calcular todas las aceleraciones en 100.000 intervalos de tiempo. Después se establece en *step* un nuevo intervalo de tiempo, en el que se indica el total que debe durar la simulación. Es importante que esté bien acotado para no ocupar tiempo de computación de forma innecesaria. Por ello en primer lugar el suelo debe estar lo más cerca posible del objeto, y en segundo no debe dejarse pasar mucho tiempo después del impacto.

En todos los modelos el suelo se situará uno o dos centímetros por debajo del airbag, y el tiempo de simulación será del orden de 0.01 segundos. Este dato se obtiene a partir de las ecuaciones de la dinámica, y se explica más adelante.

2.4. Criterios de diseño

2.4.1. Teléfono móvil

En la actualidad los teléfonos móviles están compuestos por numerosas partes y materiales con distintas propiedades, como carcasa, batería, pantalla, circuitos y componentes electrónicos o sensores, por lo que hacer un modelo que recree la realidad con exactitud resultaría muy complicado al requerir ensamblar gran cantidad de materiales con distintas geometrías y propiedades. Dado que el objetivo es optimizar el diseño de los airbags que protegen el teléfono, se ha optado por realizar una simplificación en el modelado del móvil, por lo que se ha considerado como un sólido macizo, de un único material, con una geometría prismática similar a la que se aprecia en estos objetos.

Los móviles están formados principalmente por plásticos, metales, vidrio, cerámicos y semiconductores [16]. Dado que es difícil estimar la cantidad exacta de materiales y componentes y puesto que se ha elegido modelar el objeto como sólido compacto, para realizar el diseño se ha elegido un material ficticio que resulte coherente.

Las propiedades que serán introducidas en el programa son:

TABLA 2.1. PROPIEDADES DEL MÓVIL [17]	
Dimensiones	150 x 70 x 10 mm
Masa	160 gramos
Densidad	1523.81 kg/m ³
Módulo de Young (E)	5 GPa
Coefficiente de Poisson (ν)	0.3

El peso y las dimensiones son medidas aproximadas típicas de los teléfonos que se comercializan actualmente, como el bq Aquaris X o el Samsung Galaxy S8. La densidad, propiedad requerida en Abaqus, ha sido calculada a partir de los datos anteriores de forma sencilla:

$$Densidad = \frac{masa}{volumen} = \frac{0.160 \text{ kg}}{0.15 \cdot 0.07 \cdot 0.01 \text{ m}} = 1523.81 \text{ kg/m}^3$$

El módulo de Young y el coeficiente de Poisson han sido seleccionados considerando que el objeto es la unión de muchas piezas con pequeños huecos, por lo que su rigidez es menor que la de sus componentes. Por otra parte, se ha considerado no utilizar comportamiento plástico por tratarse de una prueba de impacto, al ser un modelo aproximado y en el que se va a hacer la medición de las aceleraciones.

2.4.2. Airbags

En un principio se propuso utilizar un biopolímero para el material del airbag, como propuesta para hacer un proyecto sostenible, pero dado que estos materiales todavía no son comunes y están aún en fases de desarrollo, sus propiedades no están bien definidas y no se han hecho ensayos sobre su comportamiento en todas sus posibles aplicaciones, especialmente en materia de protección y amortiguamiento para el transporte de mercancías. Esto llevó a optar finalmente por el polietileno de baja densidad usado de forma común para fabricar este tipo de objetos.

Las características de este material son las siguientes:

TABLA 2.2. PROPIEDADES DE LOS AIRBAGS [17]	
Densidad	925 kg/m ³
Módulo de Young (E)	0.2 GPa
Coefficiente de Poisson (ν)	0.4
Límite elástico	14.5 MPa
Resistencia mecánica	30 MPa
Espesor de membrana	0.1 mm

El espesor ha sido elegido a partir de las observaciones de otros modelos comerciales de airbags fabricados para propósitos similares, aunque en esto hay gran variedad de medidas.

Las dimensiones se detallan en la presentación de los resultados, pues cada modelo ha usado airbags con dimensiones y formas diferentes.

2.4.3. Velocidad inicial

El objetivo es simular la caída del teléfono y la actuación de los airbags al impactar contra el suelo. Para ello debe haber una distancia entre objeto y suelo que dé tiempo a que el móvil se acelere y alcance cierta velocidad.

Simular de forma precisa la caída libre acelerada por la gravedad supondría un enorme coste de tiempo de computación debido a que el móvil tardaría en recorrer la distancia hasta el suelo un tiempo varios órdenes de magnitud mayor que el requerido para impactar y frenarse.

No considerar la aceleración de la gravedad tiene dos consecuencias:

En primer lugar una vez el conjunto rebota empieza a subir sin volver a tocar el suelo. Esto no tiene sentido en la realidad, pero lo único que resulta de interés es el momento de impacto, por lo que este comportamiento apenas quedará reflejado en las simulaciones. También debe considerarse que con el efecto de la gravedad tras el primer impacto rebotaría y volvería a chocar hasta que la disipación de energía provocara que el conjunto se detuviera en el suelo. No obstante cada choque es menos energético y la aceleración va disminuyendo, con lo que es el primer impacto el crítico y el único interesante para este estudio.

En segundo lugar se debe considerar que las aceleraciones que van a observarse en el móvil no son las mismas que incluyendo el efecto de la gravedad. Esta consecuencia podría resultar relevante para el análisis de resultados, no obstante como se verá las aceleraciones debidas al impacto son de valores de varios órdenes de magnitud por encima del de la gravedad, y su inclusión apenas alteraría el resultado.

Debido a esto se ha optado por acercar todo lo posible el objeto al suelo y proporcionarle una velocidad inicial en lugar de aceleración. El sistema de airbags protegería al móvil mientras va empaquetado para su distribución, por lo que una distancia razonable de caída es un metro. Con las ecuaciones de movimiento rectilíneo uniformemente acelerado se puede calcular la velocidad que debe llevar el objeto cuando va a impactar:

$$x = \frac{1}{2} a \cdot t^2$$

$$v = a \cdot t$$

$$v = a \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot x}{a}}$$

$$x = 1 \text{ m}; a = 9.8 \text{ m/s}^2$$

Se ha considerado una caída desde un metro de altura, puesto que es una distancia al suelo bastante probable para un objeto de este tipo. Si se considera una mesa o una estantería, o si está apilado durante el transporte o se cae de las manos de una persona, sería una magnitud razonable.

Despejando las ecuaciones (1) y (2) se obtiene (3), lo que proporciona una velocidad de 4.427 m/s. Puesto que una altura mayor también sería razonable, se ha decidido redondear esta cifra y se ha usado una velocidad algo mayor, de 5 m/s (lo que implica una altura de 1.275 m).

Para calcular el tiempo de simulación se debe conocer el tiempo que tarda el conjunto en llegar al suelo. Puesto que no hay aceleración se debe usar la ecuación de movimiento uniforme rectilíneo:

$$x = v \cdot t \rightarrow t = \frac{x}{v}$$

Puesto que el suelo se encontrará a aproximadamente 2 cm del airbag inferior, se obtiene un tiempo de 0.004 segundos, pero puesto que con el amortiguamiento se requiere cierto tiempo para frenarse y rebotar se ha elegido acotar el tiempo a 0.01 segundos, aunque hay variaciones en torno a este valor según los modelos.

2.4.4. Presión de los airbags

Para cumplir su función los airbags deben estar llenos de gas a presión. Puesto que el objetivo del diseño es el amortiguamiento de mercancías en condiciones ambientales comunes, se podría esperar que haya un uso a gran escala de estos sistemas de amortiguación, por lo que se ha considerado que la mejor opción es usar aire.

El aire es un recurso barato y totalmente accesible, y su único coste es el tratamiento y compresión a los que debe ser sometido. Aunque podrían usar otros gases que también sean inertes y no reaccionen con el material del airbag, como el helio, estos no ofrecen ninguna ventaja frente al aire y son más costosos.

Para optimizar el funcionamiento del airbag, se debe elegir adecuadamente la presión del aire. Si se aumenta la presión el amortiguamiento es menor y la aceleración sufrida por el teléfono aumenta, pero si es demasiado baja no frenará lo suficiente al móvil y este impactará directamente contra el suelo.

Por ello se ha realizado una prueba para el primer modelo en el que se estima la presión más adecuada. Los resultados se muestran en la siguiente gráfica, en la que se refleja la evolución de la aceleración en el móvil frente a la presión de los airbags. Conviene remarcar que la presión es manométrica.

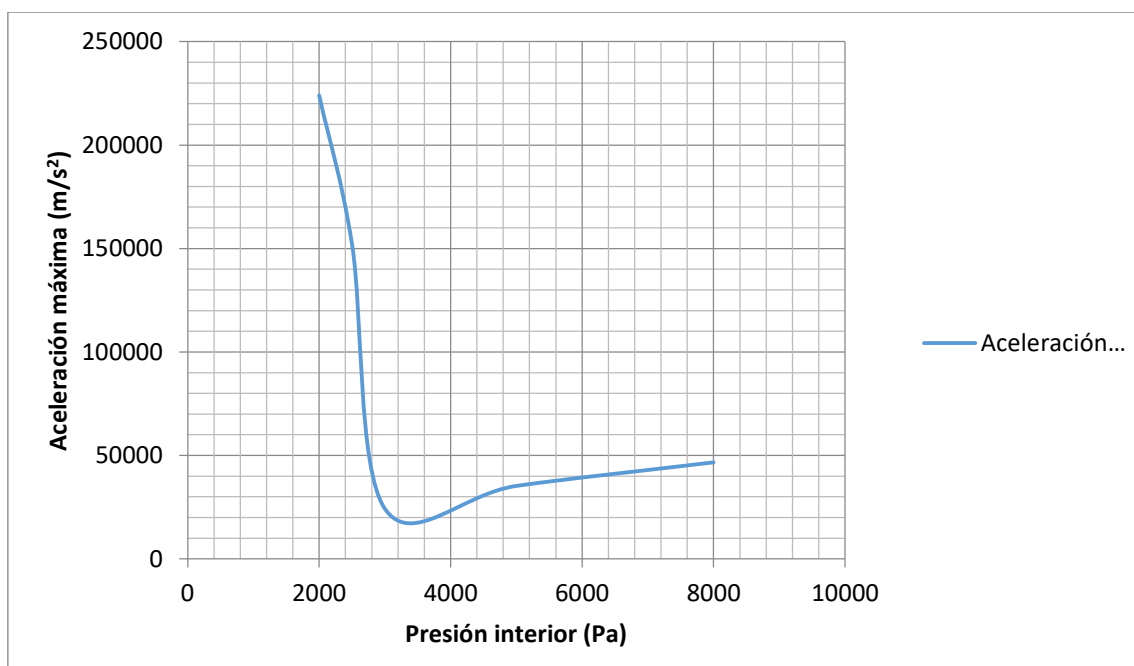


Figura 2.9. Variación de la aceleración en función de la presión de los airbags

Se puede observar que con presiones muy bajas la aceleración es muy elevada. Debido a la falta de presión el airbag no es capaz de amortiguar el impacto y el teléfono choca con el suelo.

Si se aumenta la presión lo suficiente la presión disminuye abruptamente hasta llegar a un mínimo, en el que el móvil no impacta. Si se incrementa más la presión el airbag se vuelve más rígido y amortigua peor, por lo que la aceleración aumenta. Sin embargo, dado que no se produce un impacto directo, la aceleración aumenta de forma progresiva y sigue una tendencia lineal.

Puesto que el objetivo es reducir las aceleraciones, se utilizará la presión que las minimiza. Se puede apreciar que este valor está entre los 3000 y los 4000 pascales. Para que haya cierto margen de seguridad que garantice que en ningún caso haya impacto directo se utilizará un valor de presión de 4000 pascales.

Esta presión es la más óptima para este modelo, pero utilizando una geometría distinta puede no ser la más adecuada, puesto que podría darse el caso de choque del móvil con el suelo o bien se podría reducir la presión. No obstante, el objetivo de las simulaciones es optimizar la geometría que proporciona mejores resultados, y puesto que es necesario un valor de presión apropiado se utilizará el valor de 4000 pascales como referencia para todos los modelos.

2.4.5. Prueba de convergencia de malla

Se ha comentado que el método de los elementos finitos desarrolla una aproximación discreta de un sistema continuo. La calidad de esta discretización dependerá del tamaño y tipo de los elementos. Cuanto más pequeños sean más se asemejará al modelo real. Puesto que el cálculo es realizado utilizando los elementos de la malla, es de vital importancia que esta sea precisa. Si el número de elementos es muy pequeño, los cálculos serán poco fiables y se perderá información. No obstante, si se aumenta el número de elementos llegará un punto en que el tiempo de cálculo será excesivo.

Por ello es necesario optimizar el tamaño de la malla y encontrar un valor de tamaño de elementos que proporcione fiabilidad y no requiera tiempos de procesado muy largos.

Se ha utilizado el primer modelo realizado para llevar a cabo un análisis que determine este tamaño. Dado que la intención es medir la aceleración, lo más apropiado para realizar esta prueba sería medir este parámetro para diferentes valores de tamaño de malla y comprobar la convergencia de la curva. Esto resulta complicado pues la aceleración muestra oscilaciones de alta frecuencia, y puesto que el muestreo es discontinuo, pueden producirse diferencias que impidan reflejar correctamente esta convergencia.

Para evitar esto se ha utilizado como parámetro el desplazamiento en un nodo a lo largo del tiempo. A continuación se muestra las curvas de los distintos tamaños de malla.

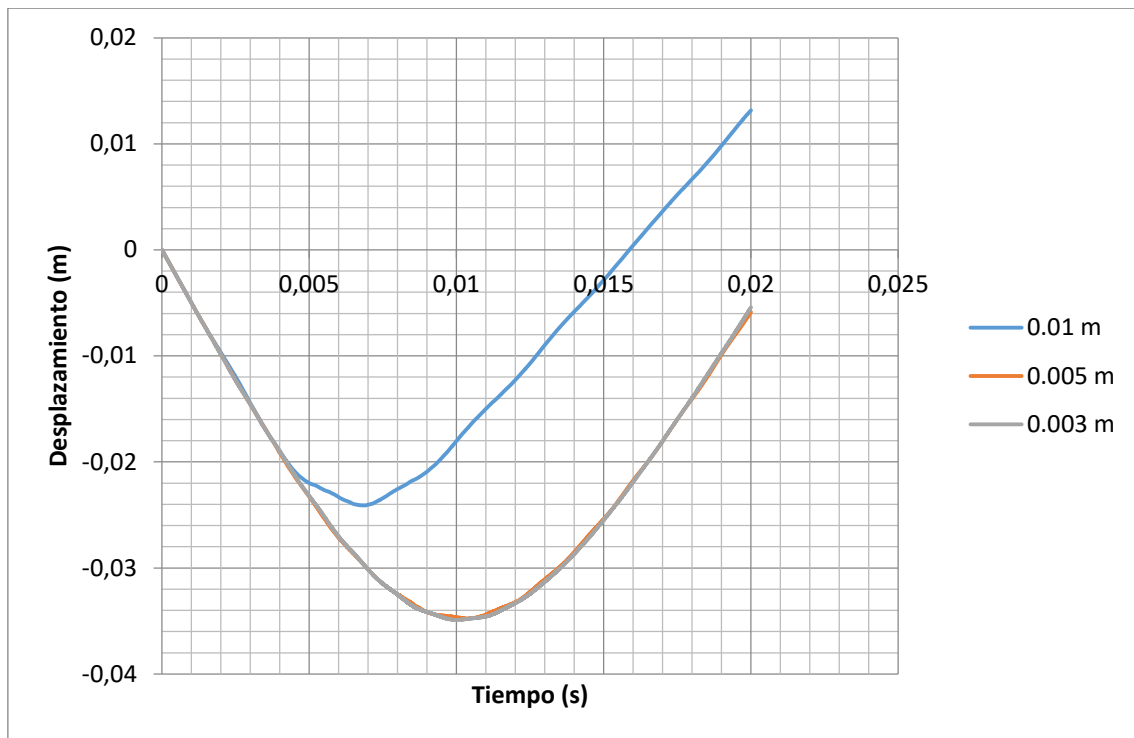


Figura 2.10. Variación del desplazamiento nodal en función del tamaño de elemento de la malla

Se comenzó con un tamaño de elementos de 1 cm y se redujo hasta 0.3 cm. Se puede observar que reducir el tamaño de un centímetro a la mitad tiene bastante efecto, sin embargo al reducir de 0.5 a 0.3 cm se observa que las curvas son idénticas.

Hacer elementos más pequeños no aportaría beneficio para la solución y alargaría el tiempo de cálculo en exceso. Se ha decidido usar un tamaño de elemento de 0.003 m para que exista un margen debido a la diversidad de geometrías en los modelos que podrían tener una convergencia ligeramente más pequeña; además no se produce un aumento importante del tiempo de cálculo al pasar de 0.005 m a 0.003 m.

También se puede apreciar cómo el aumento de calidad en el mallado ofrece una mejora progresiva del modelo desde el punto de vista de su semejanza con la realidad:

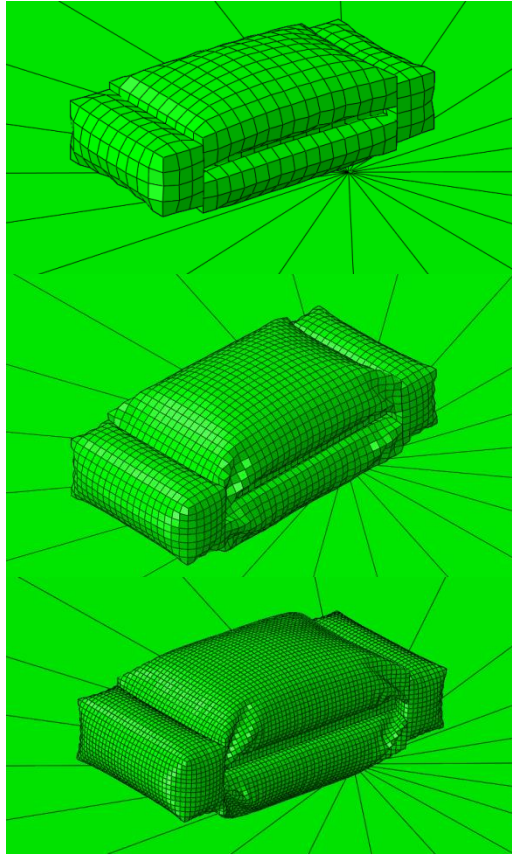


Figura 2.11. Evolución de la forma del conjunto con la variación del tamaño de elemento

En la figura se puede apreciar la diferencia entre el conjunto cuando los elementos de la malla son de 0.01 m (arriba), 0.005 m (centro) y 0.003 m (abajo).

3. RESULTADOS

3.1. Modelos realizados

A continuación se describen los modelos que se han desarrollado y se presentan las aceleraciones que han sido obtenidas. Es importante aclarar que la aceleración se produce en forma de oscilaciones complejas, en las que aparecen ondas de alta frecuencia que pueden dificultar de forma parcial el análisis comparativo entre modelos. Por otro lado debe tenerse en cuenta que el comportamiento ondulatorio hace que las cantidades sean tanto negativas como positivas, por lo que deben analizarse los valores absolutos.

Finalmente, debe considerarse que debido al muestreo discontinuo del tiempo y a las ondas de alta frecuencia es posible que algunos valores difieran un poco de lo esperado. Debe tenerse esto en cuenta para no dar lugar a interpretaciones erróneas.

3.1.1. Referencia (sin airbags)

Para tener un valor cuantitativo en la comparación del funcionamiento de los airbags se decidió hacer una primera simulación en la que el móvil impacta contra el suelo sin ningún airbag que lo proteja.

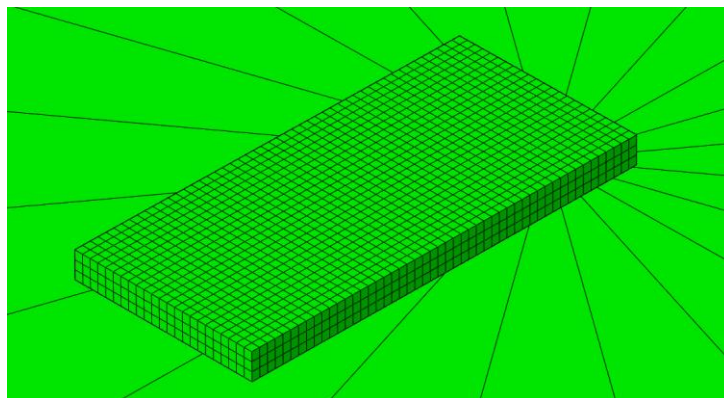


Figura 3.1. Referencia

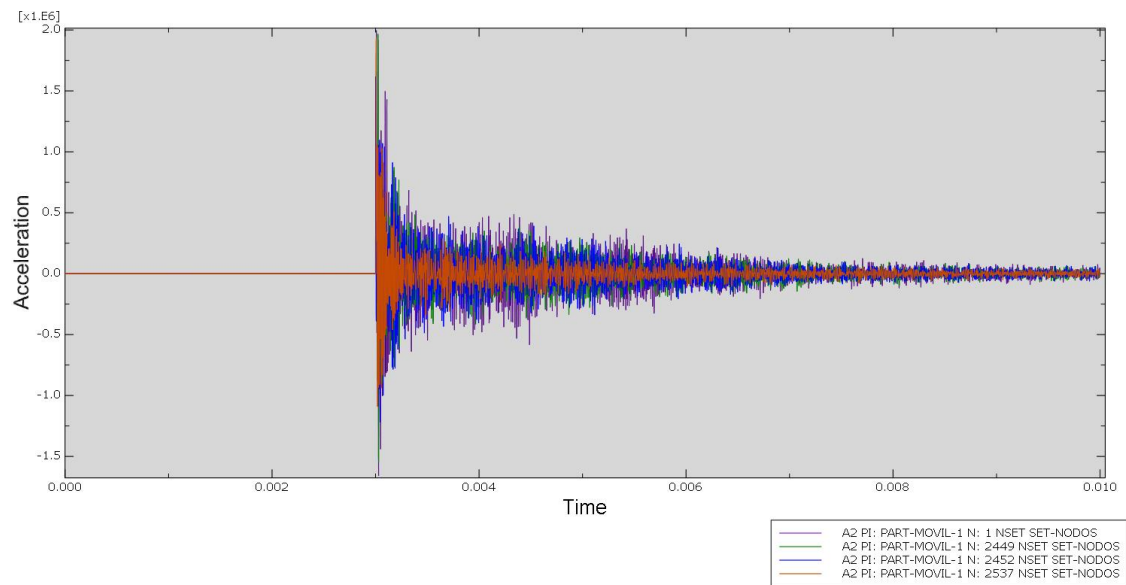


Figura 3.2. Aceleración de referencia sin airbags

Se puede observar que no hay aceleración hasta el momento del impacto, en el que aparece una aceleración de $2 \cdot 10^6 \text{ m/s}^2$. Esta se produce de forma repentina y decrece muy rápido, acercándose a cero cuando el teléfono rebota y comienza a subir.

3.1.2. Modelo 1.

Se decidió comenzar con un diseño sencillo que cubriera el airbag por completo. Se dispusieron dos airbags cubriendo las superficies superior e inferior del móvil y otros dos cubriendo los extremos. Los laterales quedan protegidos indirectamente, puesto que los airbags son más anchos que el teléfono para cumplir esta tarea.

Los airbags inferior y superior son $150 \times 100 \times 10 \text{ mm}$, mientras que los frontales son de $30 \times 100 \times 40 \text{ mm}$.

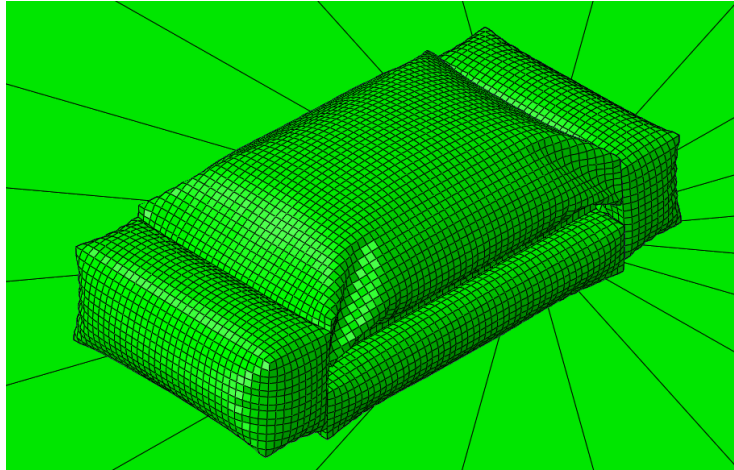


Figura 3.3. Modelo 1

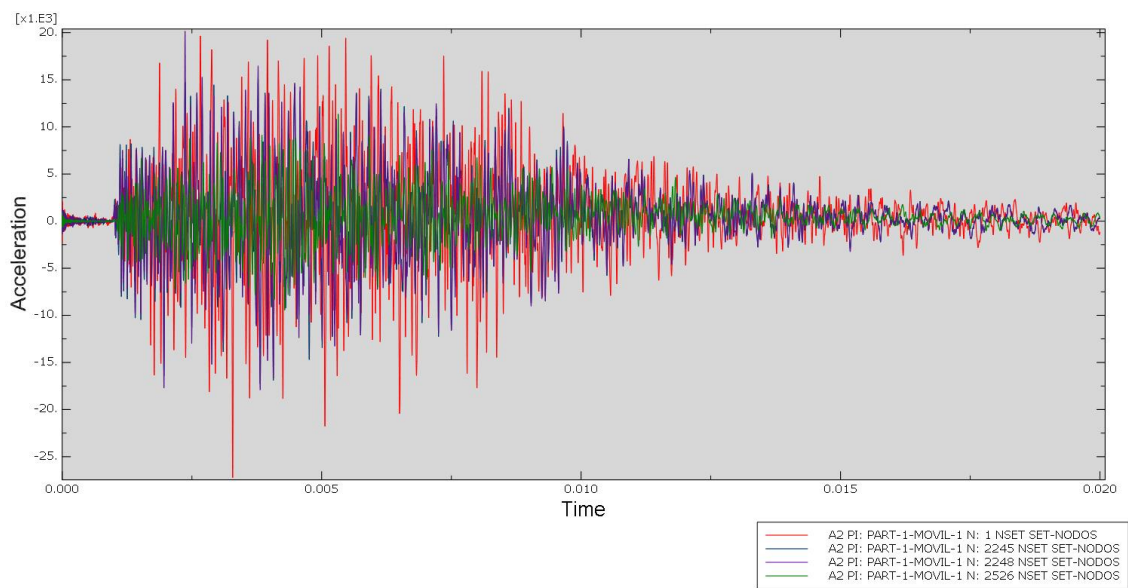


Figura 3.4. Aceleración del modelo 1

La aceleración máxima que sufre el objeto es de $27.2 \cdot 10^3 \text{ m/s}^2$. Como se detalló en el diseño del airbag, se ha optimizado la presión por lo que para este modelo la aceleración obtenida es prácticamente la mínima posible.

3.1.3. Modelo 2

Para este modelo decidió usarse una geometría similar a la del primer modelo, sin embargo se eliminaron los airbags que protegían los extremos. Los dos airbags que se mantuvieron se hicieron más largos para que protegieran todas las direcciones y se les dio forma anular.

Los airbags tienen unas dimensiones de 166x100x20 mm, con un hueco en el centro que proporciona una forma prismática de unos 20 mm de grosor.

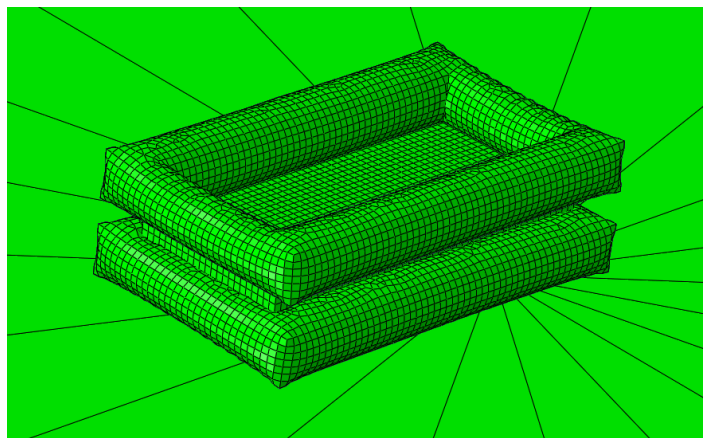


Figura 3.5. Modelo 2

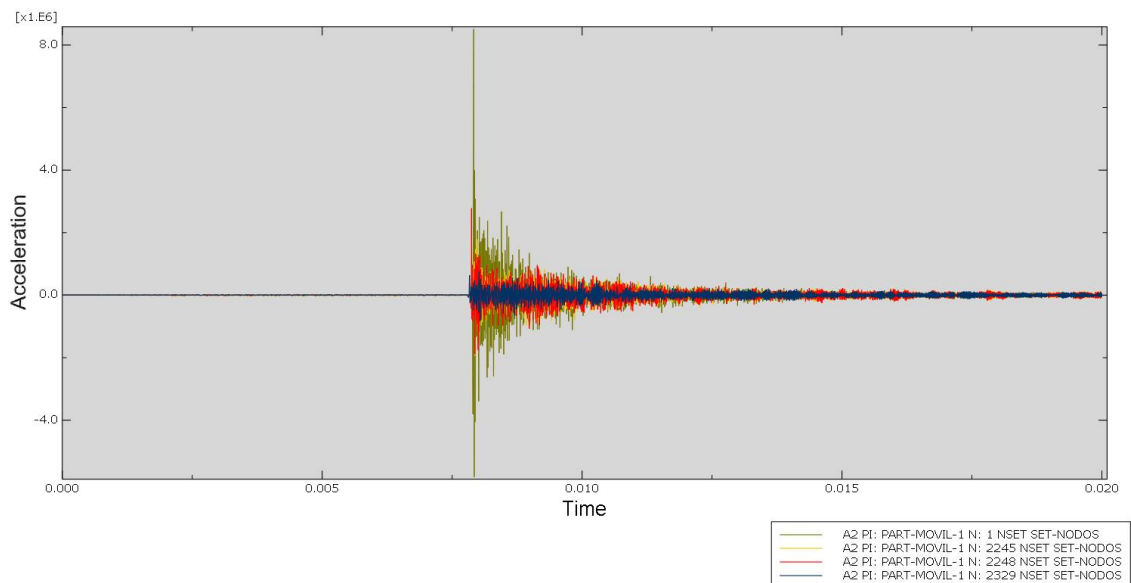


Figura 3.6. Aceleración del modelo 2

Se puede observar en la gráfica que en este modelo el móvil choca contra el suelo, produciéndose una aceleración de $8 \cdot 10^6 \text{ m/s}^2$. Esto se debe a que la superficie de contacto del airbag con el teléfono es pequeña y no es capaz de soportar la tensión por la caída de este.

Para evitar esto se tuvo que aumentar la presión de los airbags a 20.000 Pa.

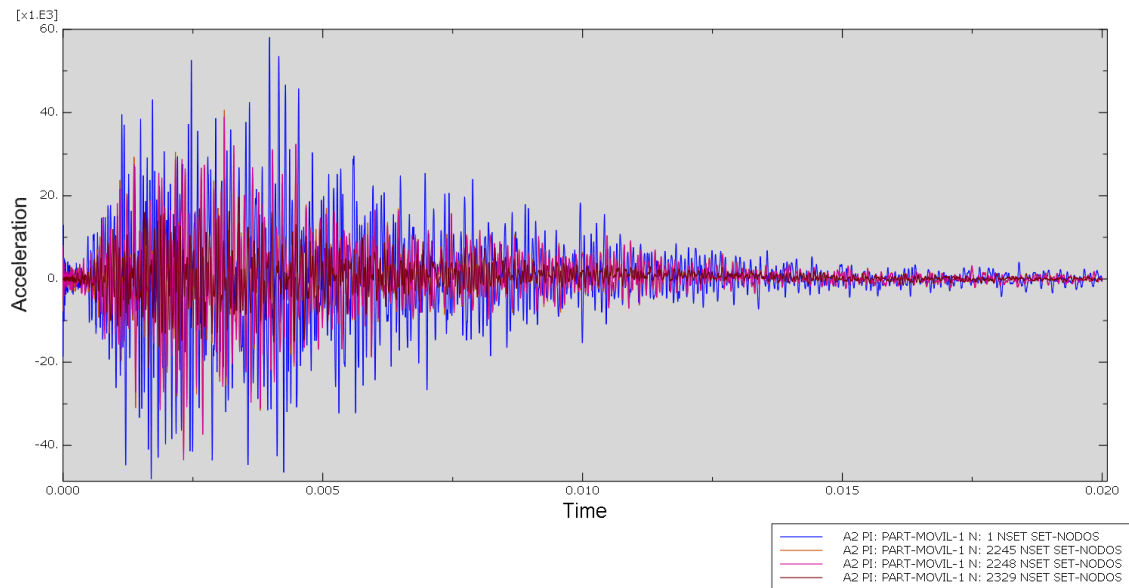


Figura 3.7. Aceleración de modelo 2 con presión aumentada

Como se puede observar se produce el efecto deseado de amortiguación, y la aceleración máxima es de 60.000 m/s^2 . Ha sido necesario aumentar la presión cinco veces con respecto al primer modelo para evitar el choque, y aunque se ha cumplido el objetivo la aceleración es bastante alta comparada con el primer modelo.

Resulta claro que el problema del modelo radica en la escasa superficie de contacto, por lo que se realizó una modificación (modelo 3).

3.1.4. Modelo 3

Para mejorar el funcionamiento del modelo 2 se realizó una modificación de la geometría eliminando el vaciado que se había aplicado a los airbags. De esta forma quedan dos airbags con forma de bloque de 166x100x20 mm, que al hincharse se puede ver que ocupan mayor volumen que en el caso anterior.

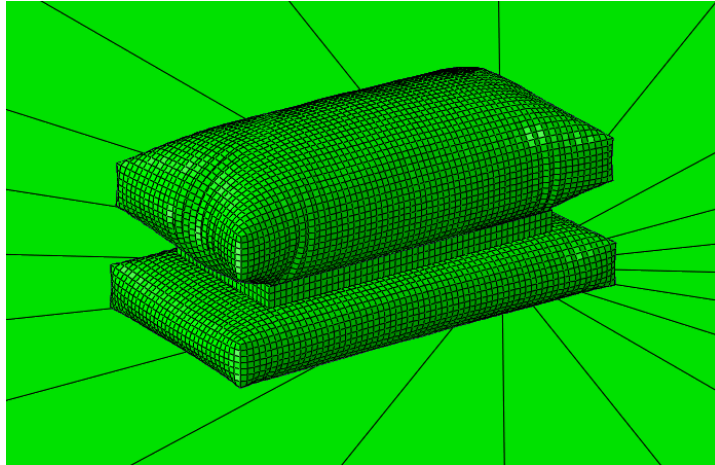


Figura 3.8. Modelo 3

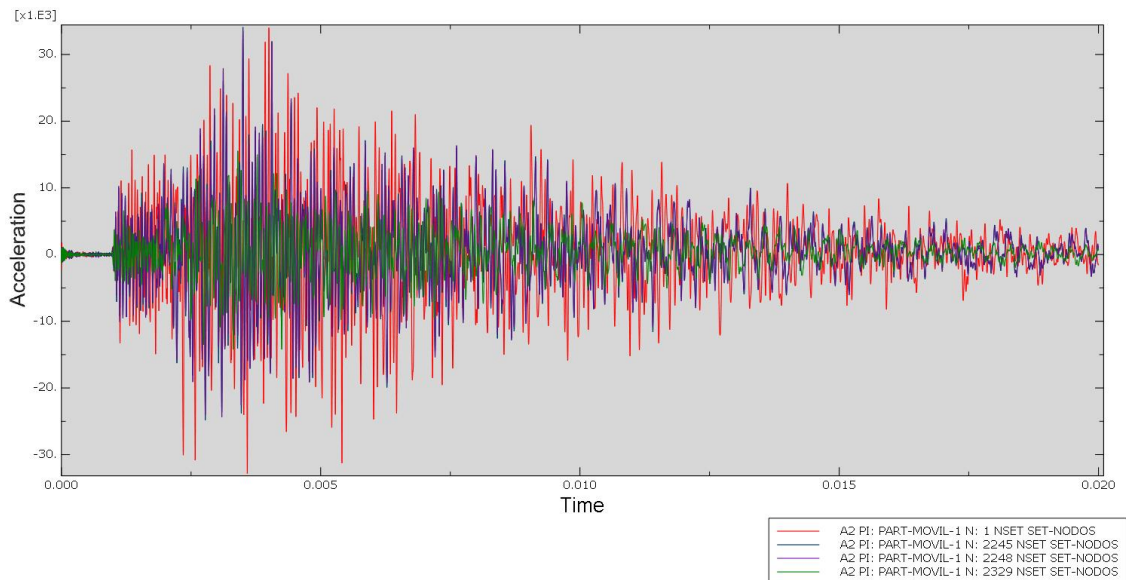


Figura 3.9. Aceleración del modelo 3

Con esta modificación se ha podido reducir la presión a los 4000 Pa tomados como referencia, con lo que se ha obtenido una aceleración de 34.000 m/s^2 . Se puede apreciar que además la aceleración es mucho menor, en parte debido a la menor presión pero también por la mayor superficie de contacto, que genera menor tensión en el móvil y produce una deceleración más progresiva.

3.1.5. Modelo 4

Este modelo trató de cumplir el objetivo de optimizar al máximo posible el tamaño de los airbags. Para ello se dispuso de doce airbags situados en los laterales del móvil con unas dimensiones mucho menores que las anteriormente expuestas.

La reducción de tamaño ha llevado a hacer airbags de sección cuadrada de 20 mm de lado y con un grosor de 2 mm.

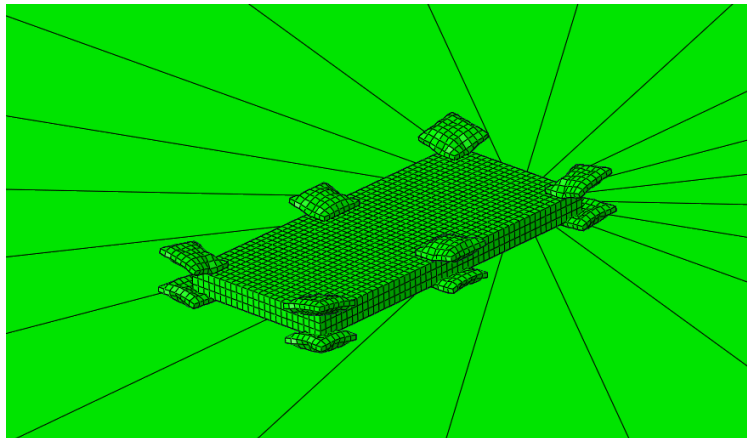


Figura 3.10. Modelo 4

Dadas estas dimensiones se optó por elevar la presión interior a 25000 pascales. Sin embargo, debido al tamaño, los airbags centrales soportan mayor tensión y no frenan al móvil, produciéndose así el impacto. Al ser la presión bastante elevada y con estos resultados se ha considerado este modelo como fallido, y muestra que no es posible reducir el tamaño de los airbags a este nivel.

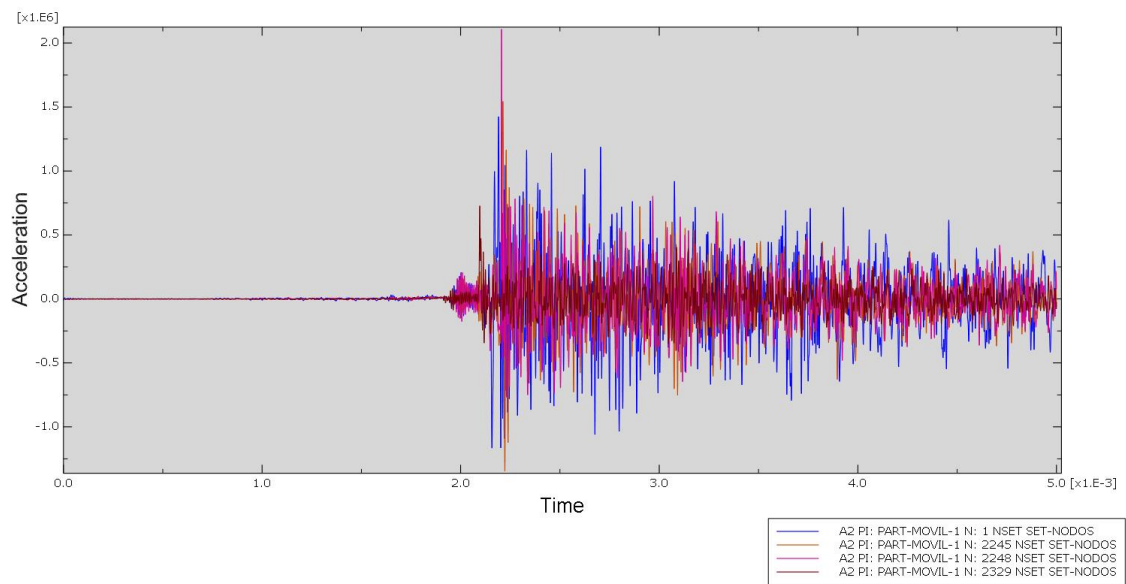


Figura 3.11. Aceleración del modelo 4

Se puede observar que antes del impacto hay un aumento pequeño de la aceleración. Esto se debe a que los airbags de los extremos están menos exigidos y son capaces de frenar en mayor medida al móvil; sin embargo los que están situados en el centro deben soportar mayor presión del objeto y no pueden evitar el impacto. Esto implica que un diseño como este no reparte de forma apropiada las cargas, lo que lleva a la conclusión de que para un modelo que utilice airbags en zonas puntuales y no envuelvan por completo el airbag se requiere mayor protección en el centro de gravedad, donde las fuerzas serán mayores, además del donde haya menos contacto, como los laterales si la caída se produce desde otro ángulo.

3.1.6. Modelo 5

De nuevo se ha tratado de invertir el menor espacio posible en los airbags, aunque este diseño es más sencillo y usa cuatro airbags de forma prismática alargada que cubren los bordes a lo largo del teléfono.

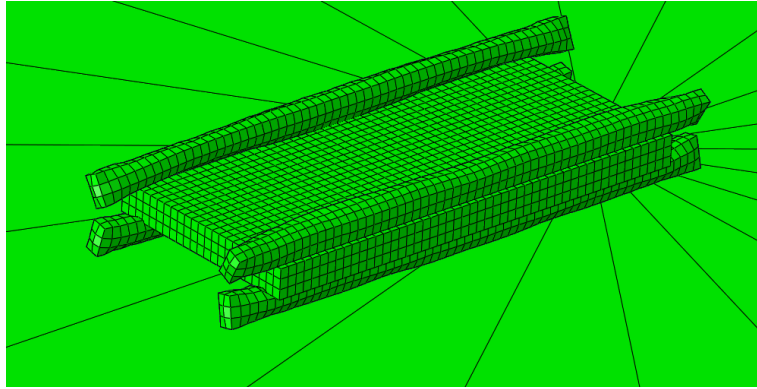


Figura 3.12. Modelo 5

Estos airbags tienen una longitud de 180 mm y una sección rectangular de 5x10 mm. Están situados de forma que cubren el teléfono en las tres direcciones principales.

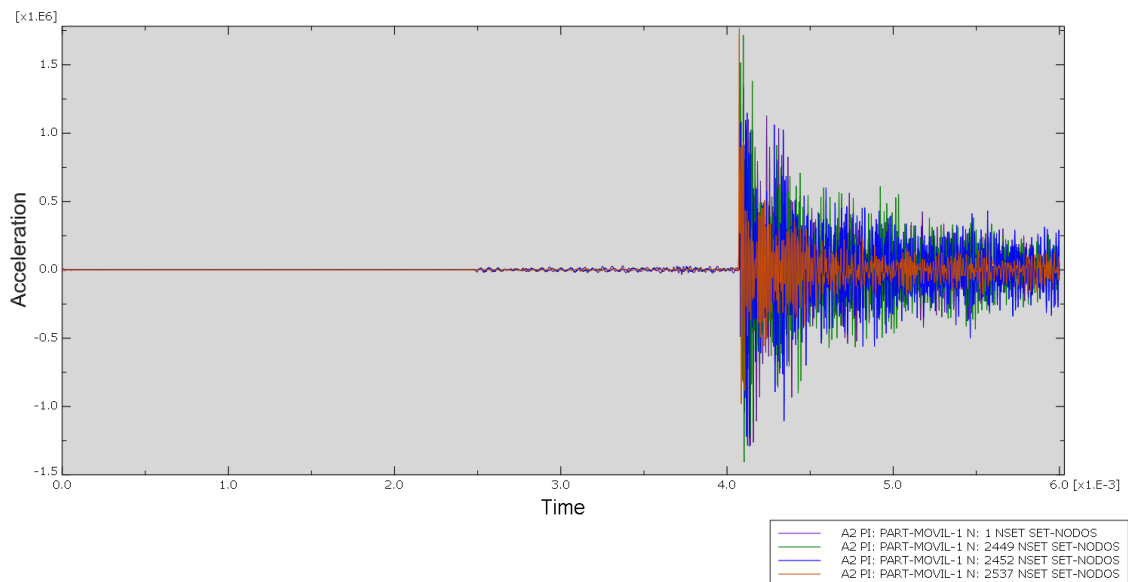


Figura 3.13. Aceleración del modelo 5

Se observa que a pesar de la alta presión se produce impacto. La conclusión es que airbags tan pequeños no resultan útiles a menos que se incremente la presión en una proporción poco realista. Esto ha llevado a rediseñar este modelo aumentando el tamaño de los airbags.

La geometría se ha mantenido pero las dimensiones han aumentado a 200 mm de longitud con sección de 25x20 mm.

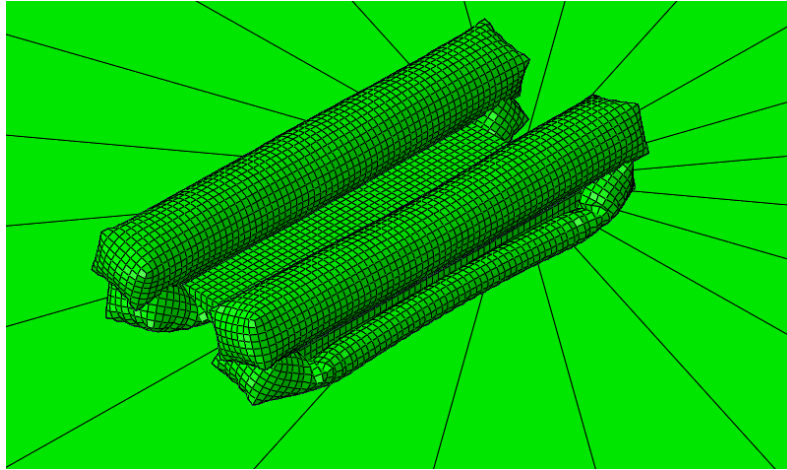


Figura 3.14. Modelo 5 con airbags modificados

Con ello se consiguió el resultado esperado, aunque fue necesario mantener una presión de 12000 Pa, debido de nuevo a la pequeña superficie de contacto entre móvil y airbag. Se observa ahora un máximo de $36 \cdot 10^3 \text{ m/s}^2$.

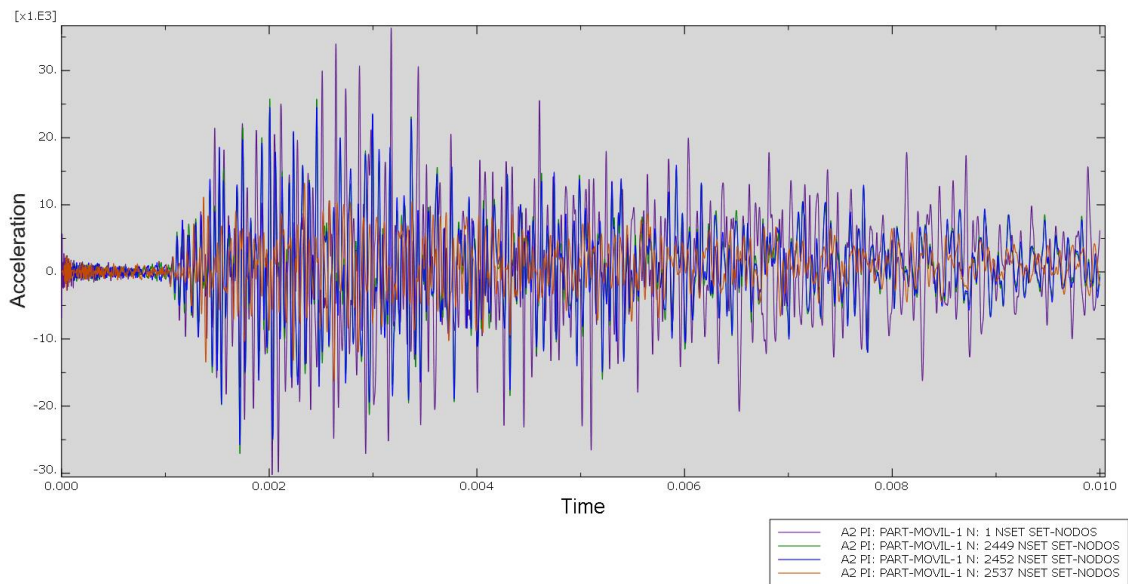


Figura 3.15. Aceleración del modelo 5 modificado

3.1.7. Modelo 6

En este modelo se consideró el usar mayor número de airbags con una geometría diferente. En primer lugar se utilizaron ocho airbags, dos en los extremos y los otros seis cubriendo el teléfono en su longitud. Se dispuso uno en cada lateral, dos en la superficie superior y otros dos en la inferior. En lugar de una geometría prismática se utilizó una geometría semicilíndrica. Esta alternativa se planteó con la idea de que el choque de los airbags fuera más progresivo y así la deceleración del cuerpo comenzara antes.

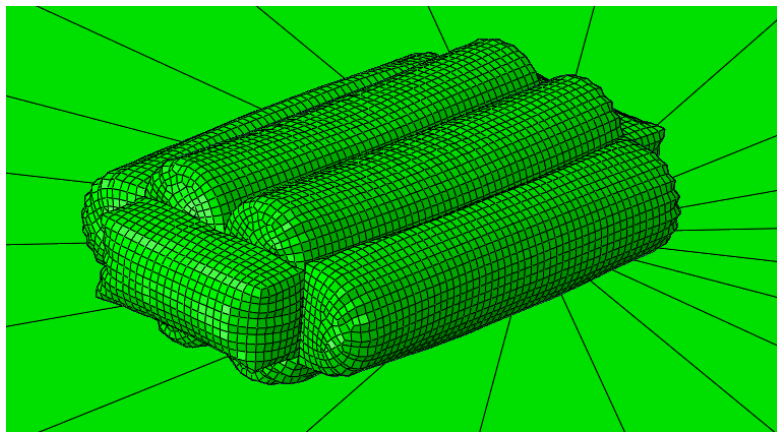


Figura 3.16. Modelo 6

Los airbags usados para tapar los extremos son similares a los del primer modelo, aunque con unas dimensiones de 20x70x30 mm. Los otros seis airbags tienen una forma prismática con el borde exterior redondeado. Presentan una longitud de 150 mm y una sección de 35 mm de ancho con altura máxima de 17 mm.

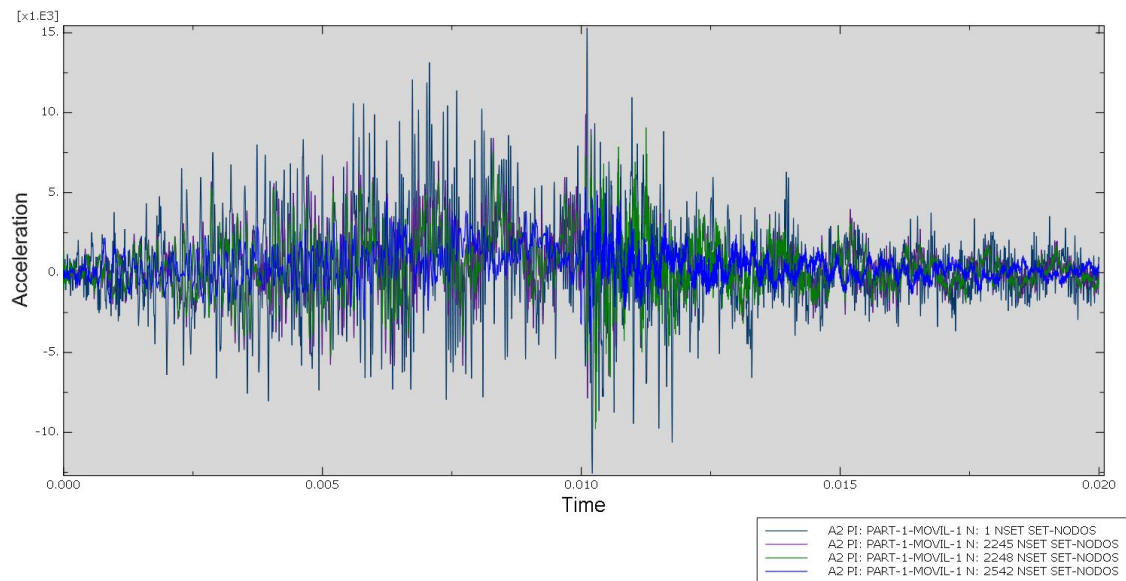


Figura 3.17. Aceleración del modelo 6

Este modelo tiene un máximo de 15.000 m/s^2 , y se puede observar en la gráfica que la curva es ligeramente distinta a la de otros modelos. Esto puede deberse a lo comentado, pues el amortiguamiento se hace de forma más lenta, reduciendo la carga sobre el teléfono.

3.1.8. Modelo 7

Se decidió hacer un último modelo que fuera distinto. Se utilizó para ello medias esferas de 2 cm de radio como airbags, y con una presión de 4000 pascuales.

Se colocó un total de 16 airbags, cuatro en cada superficie del objeto, de forma que se protegiera el móvil en todas direcciones. Además el uso de mayor número de airbags distribuidos de forma uniforme facilita que ninguno de ellos falle.

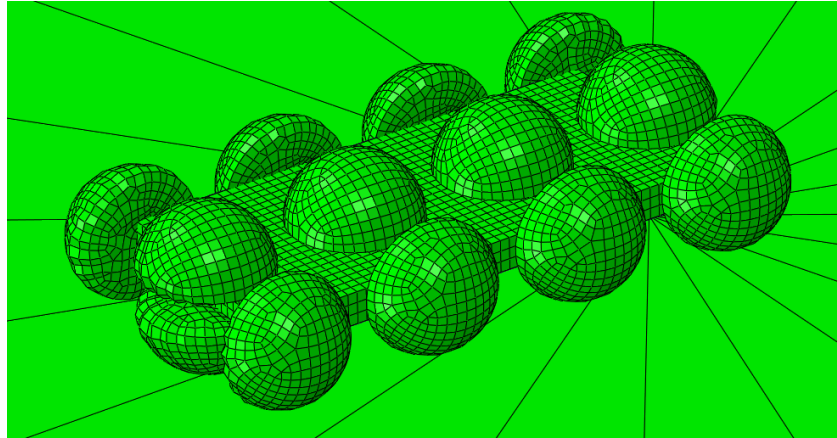


Figura 3.18. Modelo 7

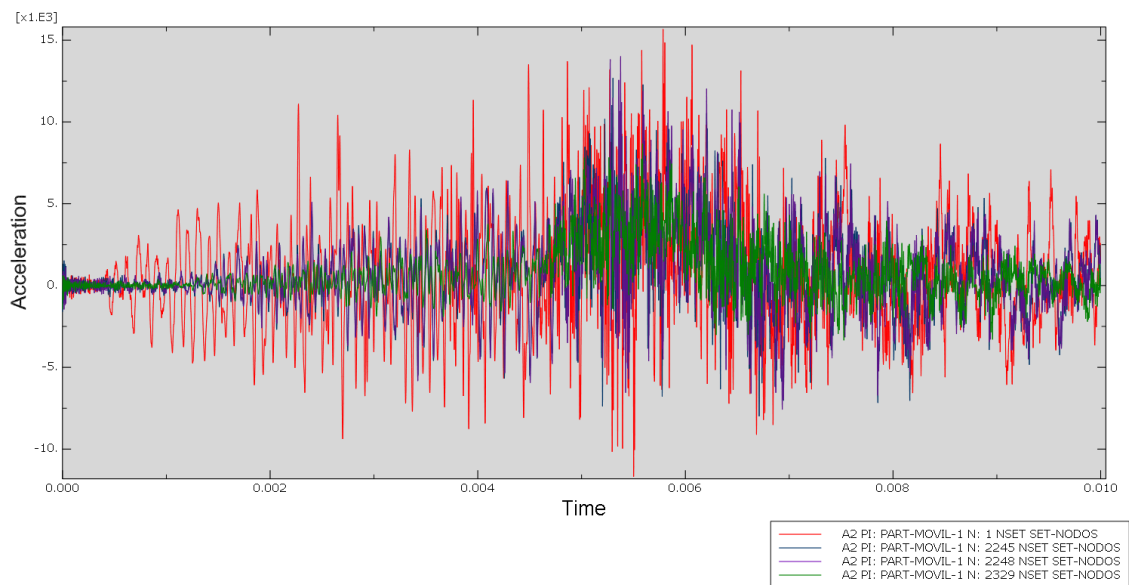


Figura 3.19. Aceleración del modelo 7

La aceleración obtenida es de 15000 m/s², y se observa que de nuevo la curva presenta una aceleración más distribuida a lo largo del tiempo que en otros modelos.

3.2. Análisis de resultados

En primer lugar se observa la influencia del amortiguamiento en la reducción del orden de magnitud de la aceleración: mientras que sin airbags aparece una aceleración del orden de 10^6 m/s^2 , cuando los airbags frenan el teléfono la aceleración se reduce al orden de 10^3 m/s^2 .

Esto significa que la protección de los airbags reduce la aceleración unas 1000 veces. Además se puede observar que en todos los modelos en los que los airbags cumplen correctamente su función la magnitud de la aceleración es la misma, con valores comprendidos entre los $15 \cdot 10^3$ y $60 \cdot 10^3 \text{ m/s}^2$.

Otro resultado importante es el que proporcionan los modelos cuyos airbags han resultado ineficaces. El hecho de que el móvil impacte directamente contra el suelo provoca que aparezcan aceleraciones del orden de 10^6 m/s^2 , el mismo que cuando no hay airbags; también se puede apreciar que el valor en todos los casos es prácticamente el mismo, de $2 \cdot 10^6 \text{ m/s}^2$, lo cual indica que el efecto de los airbags es completamente nulo, pues además de impactar el teléfono lo hace con la misma fuerza.

Este hecho queda claramente mostrado en la siguiente imagen:

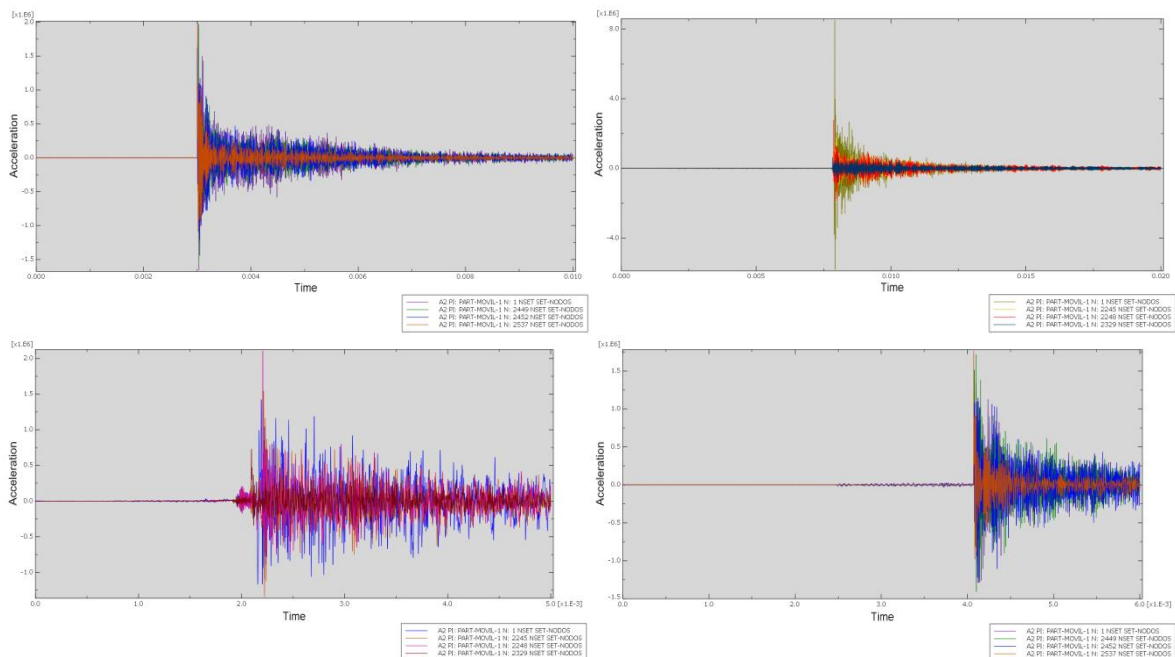


Figura 3.20. Comparación de aceleraciones de modelos fallidos (por orden)

En la imagen se compara el resultado del modelo que no tiene airbags (gráfica superior izquierda) con los otros tres modelos en los que se ha producido el choque.

Se puede apreciar que las gráficas son muy similares. No hay ninguna aceleración hasta que el teléfono choca con el suelo, momento en el que aparece repentinamente un pico que decrece muy rápido.

Existen pequeñas diferencias entre cada modelo. Por un lado, el carácter ondulatorio complejo con oscilaciones de alta frecuencia que presenta la aceleración dificulta la repetición exacta del resultado. Al haber airbags situados de forma diferente con geometrías completamente distintas el impacto se produce de forma diferente. Esto puede observarse en la gráfica correspondiente al modelo 4 (gráfica inferior izquierda) que muestra un decrecimiento más lento y progresivo de la aceleración, debido a que los airbags situados en las esquinas del móvil sí evitan el impacto directo (de forma localizada, pues en la zona central del teléfono sí se produce impacto, lo que provoca que al rebotar el conjunto haya mayor oscilación.

Por otra parte se aprecia una pequeña oscilación en la aceleración en el tiempo previo al choque en las gráficas inferiores. Este valor es insignificante, aunque observable, y se produce debido al choque de los airbags. Por último se debe comentar que debido a la discontinuidad tanto de la malla como del muestreo temporal se pueden producir variaciones en el resultado, lo que es la causa probable de que el valor que aparece en el modelo 2 (gráfica superior derecha) sea cuatro veces mayor que si no hay airbags.

Otro hecho destacable es que las curvas obtenidas para los modelos que han funcionado también son similares entre sí.

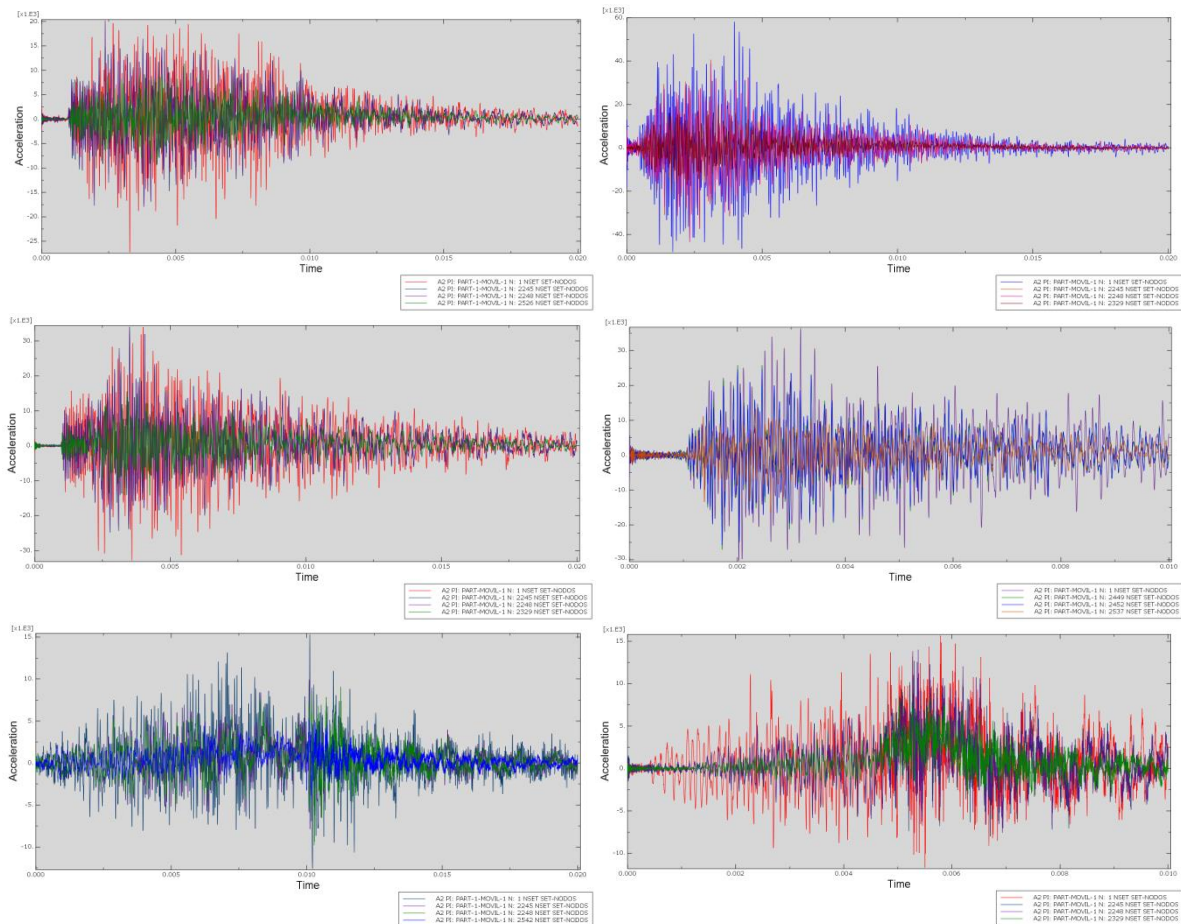


Figura 3.21. Comparación de aceleraciones de modelos exitosos (por orden)

Se observa que la aceleración aumenta de forma progresiva hasta llegar a un valor máximo, a partir del cual decrece. Esto refleja la capacidad de amortiguamiento: el teléfono va frenándose hasta detenerse, momento a partir del cual comienza a subir. La presión del aire hace que desde que el airbag entra en contacto con el suelo el móvil sufra una deceleración.

Por otra parte el valor máximo alcanzado es, como se ha comentado, tres órdenes de magnitud menor que sin airbags. Así se observa que la reducción de la aceleración se hace de forma que se distribuye su variación en el tiempo, de manera que el teléfono permanece más tiempo sometido a fuerzas, pero estas son mucho menores.

Sin embargo resulta más relevante considerar las diferencias entre las gráficas. Se observa que hay una gran variación en el valor de las aceleraciones, que van de los

15.000 a los 60.000 m/s^2 . El valor más alto se ha obtenido en el modelo 2, en el que la presión era cinco veces superior a la de otros modelos. Esto lleva a concluir que aunque el modelo funcione y proteja el teléfono de impactos lo hace de forma ineficaz.

Por otro lado los modelos 1, 3 y 5 ofrecen resultados similares, de en torno a 30.000 m/s^2 , lo que puede deberse a la similitud de la geometría. El modelo 5 (gráfica central derecha) sufre una aceleración algo mayor, debido a que se tuvo que aumentar la presión, pero la mayor diferencia se presenta en los valores que aparecen cuando el conjunto comienza a subir, puesto que se observa que las oscilaciones decrecen más despacio. Esto se puede deber a la localización de los airbags, que al estar situados en los extremos provocan diferencias locales en la aceleración, que es mayor en el centro, donde no hay protección, por lo que las tensiones posiblemente sean mayores. El resultado puede reflejarse en mayores fluctuaciones de la aceleración.

Los modelos 6 y 7 son sin embargo los que aportan los resultados más relevantes. El valor máximo que reflejan es de 15.000 m/s^2 , la mitad de lo que se da los otros modelos. Puesto que la presión ha sido la misma y las dimensiones apenas han variado, se concluye que las geometrías usadas en estos modelos son las que mejor optimizan el funcionamiento del airbag y cumplen mejor su objetivo.

También se puede ver que las gráficas de estos dos modelos (las dos inferiores de la figura) son muy similares entre sí, mientras presentan algunas diferencias con respecto a las de los otros cuatro modelos. Se observa que la aceleración aumenta de forma mucho más gradual en los modelos 6 y 7, y se mantiene estable más tiempo antes de volver a reducirse. Esto implica que el amortiguamiento es más eficiente, y supone un paso más de mejora con respecto a los otros modelos, pues al distribuirse la aceleración a lo largo de más tiempo los valores máximos se reducen considerablemente.

En cuanto a la geometría se pueden distinguir dos diferencias principales entre estos dos modelos y todos los anteriores. En primer lugar, el uso de formas curvas parece incrementar el efecto de amortiguamiento progresivo, puesto que la superficie de contacto entre el airbag y el suelo aumenta con el tiempo, haciendo que la fuerza de impacto se distribuya mejor.

En segundo lugar el uso de mayor número de airbags permite que el aire se mantenga en zonas donde la compresión es mayor al no poder redistribuirse. Para el modelo 6 se puede apreciar que los airbags situados en la zona inferior son similares en tamaño a los

del modelo 1; sin embargo al haber dos airbags y estar limitados en los laterales por otro el aire se mantiene distribuido de forma que frena el teléfono con mejores resultados, como se ha explicado anteriormente.

Finalmente se puede resaltar que los valores de aceleraciones obtenidos, tomados de forma absoluta, son muy elevados: en el mejor resultado se obtienen unas 1000 veces la aceleración de la gravedad terrestre, por lo que habría que comprobar con más detalle si los componentes de un teléfono son capaces de soportar esa aceleración.

4. PRESUPUESTO

En este apartado se hace una estimación del presupuesto necesario para desarrollar el trabajo. Se debe considerar que existe un coste derivado del uso del equipo, tiempo de desarrollo, redacción, etc. Además se han considerado dos posibilidades: su realización en el ámbito empresarial, como proyecto para un modelo comercial, y su desarrollo en el ámbito académico, con fines de investigación. Se ha establecido esta diferenciación de cara a comparar la variación que puede suponer el coste de la licencia de Abaqus en el total del trabajo.

Para realizar una estimación realista, se ha usado la propuesta económica de la universidad Carlos III, según los datos establecidos en 2003, a los que se aplica una variación por la inflación. El coste de equipo y licencia también se ha establecido en función del tiempo de uso.

Se estima que el tiempo que ha llevado realizar el proyecto es de dos meses (ocho semanas), invirtiendo cinco días laborables por semana y seis horas al día. Por tanto se estima que el tiempo total es de doscientas cuarenta horas. De esas horas, se considera que la mitad son invertidas en el manejo de Abaqus. Puesto que ha sido necesario un ordenador para todas las tareas su uso será del total de horas.

Además de las doscientas cuarenta horas de trabajo individual, se estiman unas veinticinco horas de trabajo del tutor, que han sido invertidas en formación y orientación. También deben considerarse gastos generales de luz, internet y otros servicios que se contarán como un 15% añadido al coste de personal.

Para los gastos de equipo se considera la fracción del coste de la licencia anual del Abaqus que corresponde al tiempo invertido; y para el ordenador se estima un coste de amortización de tres años, de los que se incluye en el presupuesto la cantidad correspondiente a los dos meses.

A continuación se expone con detalle el presupuesto total:

TABLA 5.1. PRESUPUESTO				
Gastos	Tipo	Precio	Tiempo	Total
Personal	Ayudante	22.77 €/h	240 h	5464.80 €
	Catedrático	57.39 €/h	25 h	1434.75 €
Generales	Proporcional a gato de personal	15%		1034.93 €
Equipo (PC)	Amortización (total 400 €)	11.11 €/mes	2 meses	22.22 €
Licencia Abaqus	Comercial	13000 €/año	1 mes	1083.33 €
	Académica	3000€/año	1 mes	250 €
IVA	Porcentaje del total	21%		1898.40 € (comercial)
				1723.41 € (académica)
			PRECIO FINAL:	10938.43 € (comercial)
				9930.10 € (académico)

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1. Conclusiones

Tras la realización del presente estudio se pueden extraer algunas ideas. En primer lugar, se ha comprobado que la reducción de las dimensiones y la cantidad de airbags necesarios para la protección del móvil es muy limitada, pues si se utilizan airbags pequeños y se sitúa poca cantidad o bien no cumplen su función o lo hacen de forma deficiente, pues el aumento de presión conlleva mayor aceleración de forma inevitable.

Por ello si se trata de minimizar el tamaño del sistema de amortiguamiento se debe optar por otro método, mientras el uso de un sistema de airbags será más apropiado si se debe priorizar la calidad de la protección.

Otra conclusión es que la distribución uniforme de los airbags sobre la superficie del objeto mejora los resultados al distribuir con más uniformidad las tensiones. También se puede concluir que la superficie de contacto es uno de los factores más influyentes, y para lograr un diseño óptimo se debe garantizar que haya el máximo contacto entre el airbag y el móvil.

También debe considerarse que al realizarse las simulaciones siempre en una dirección la mejora ante caídas en cualquier otra dirección ha quedado apartada, dando como resultado modelos que aunque funcionan bien tal como han sido probados probablemente fallarían en un ensayo diferente. Un ejemplo es el modelo 1, que en la dirección del ancho del teléfono tiene una protección deficiente que probablemente fallaría.

Por todo lo anterior se deduce que no sólo la geometría de los airbags influye en el resultado, sino también la geometría del objeto a proteger. Esto lleva a concluir que el diseño de los airbags debe ser realizado para cada objeto de una forma específica.

Finalmente el resultado más importante que se ha conseguido es el de encontrar el modelo que mejor evita el impacto. Se han alcanzado dos conclusiones: se debe usar el mayor número de airbags posible y estos deben tener superficies curvas. Estas dos características combinadas con el resto de resultados expuestos pueden resultar relevantes para mejorar un sistema de amortiguamiento con airbags.

5.2. Trabajos futuros

El estudio realizado ha tenido algunas limitaciones sobre las que un desarrollo más exhaustivo podría llevarse a cabo. Se ha considerado la protección frente a impactos como caídas, sin embargo un objeto puede exponerse a daños por otros motivos. Un estudio sobre la respuesta ante vibraciones y compresión podría completar el objetivo de lograr la protección mecánica del objeto.

Se considera de mayor importancia completar el estudio de amortiguamiento contra impactos mejorando los diseños para tener en cuenta la posible dirección de la caída. Todos los modelos que se han probado han sido en la misma dirección; además la que se ha escogido es la más favorable para el objeto al ser la normal del plano de mayor superficie del teléfono. Esto hace que mejorar el diseño para que sea efectivo en todas las direcciones cobre mayor importancia.

También podría seguir el proceso de mejora para reducir todo lo posible las aceleraciones que se han obtenido en estos casos, pues aunque los valores tienen un valor cualitativo, en el mejor de los casos se obtienen aceleraciones de 1000 veces la gravedad, lo cual es bastante elevado.

Por último se podría tratar de realizar un modelado del teléfono que tuviera en cuenta sus diversas partes y componentes, pues se podrían medir las tensiones en distintos puntos y se obtendrían resultados mucho más exactos. Aunque dada la complejidad de los móviles actuales sería muy costoso de hacer, permitiría encontrar valores absolutos de la aceleración que estos objetos pueden soportar.

REFERENCIAS

- [1] Anne Emblem y Henry Emblem, *Packaging technology fundamentals, materials and processes*, 1.^a ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2012.
- [2] C. Y. Barlow y D. C. Morgan, «Polymer film packaging for food: An environmental assessment», *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 78, pp. 74-80, sep. 2013.
- [3] A. Hernández-Pérez, R. Häggglund, L. A. Carlsson, y F. Avilés, «Analysis of twist stiffness of single and double-wall corrugated boards», *Compos. Struct.*, vol. 110, pp. 7-15, abr. 2014.
- [4] «Packaging and Containers: What is Corrugated board? - Quora». [En línea]. Disponible en: <https://www.quora.com/Packaging-and-Containers-What-is-Corrugated-board>. [Accedido: 24-sep-2018].
- [5] J. Valenti-Jordan, «Metal Packaging», en *Reference Module in Food Science*, Elsevier, 2016.
- [6] Chris, «Bubble Wrap: A Short History», *The Packaging Company*, 30-ene-2017. .
- [7] A. Rudin y P. Choi, «Chapter 13 - Biopolymers», en *The Elements of Polymer Science & Engineering (Third Edition)*, A. Rudin y P. Choi, Eds. Boston: Academic Press, 2013, pp. 521-535.
- [8] D. Wang, «Impact behavior and energy absorption of paper honeycomb sandwich panels», *Int. J. Impact Eng.*, vol. 36, n.º 1, pp. 110-114, ene. 2009.
- [9] A. Castiglioni, L. Castellani, G. Cuder, y S. Comba, «Relevant materials parameters in cushioning for EPS foams», *Colloids Surf. Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 534, pp. 71-77, dic. 2017.
- [10] D. Cadogan, C. Sandy, y M. Grahne, «Development and evaluation of the mars pathfinder inflatable airbag landing system», *Acta Astronaut.*, vol. 50, n.º 10, pp. 633-640, may 2002.
- [11] C. Y. Zhou y T. X. Yu, «Analytical models for shock isolation of typical components in portable electronics», *Int. J. Impact Eng.*, vol. 36, n.º 12, pp. 1377-1384, dic. 2009.
- [12] O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor, y J.Z. Zhu, *El método de los elementos finitos*, 6.^a ed., vol. 1, 3 vols. Barcelona: CIMNE, 2010.
- [13] T. Fadiji, C. J. Coetzee, T. M. Berry, A. Ambaw, y U. L. Opara, «The efficacy of finite element analysis (FEA) as a design tool for food packaging: A review», *Biosyst. Eng.*, vol. 174, pp. 20-40, oct. 2018.
- [14] H. Naghibi Beidokhti *et al.*, «A comparison between dynamic implicit and explicit finite element simulations of the native knee joint», *Med. Eng. Phys.*, vol. 38, n.º 10, pp. 1123-1130, oct. 2016.
- [15] J. S. Sun, K. H. Lee, y H. P. Lee, «Comparison of implicit and explicit finite element methods for dynamic problems», *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 105, n.º 1, pp. 110-118, sep. 2000.
- [16] P. Sarath, S. Bonda, S. Mohanty, y S. K. Nayak, «Mobile phone waste management and recycling: Views and trends», *Waste Manag.*, vol. 46, pp. 536-545, dic. 2015.
- [17] W.D. Callister y D.G. Rethwisch, *Ciencia e ingeniería de materiales*, 2.^a ed. Barcelona: Reverté, 2016.